

Trabajo de fin de grado

**“CONTRASTE METODOLÓGICO EN LOS MDT
REALIZADOS CON DRONES”**

**“METHODODOLOGICAL CONTRAST IN THE MDT
MADE WITH DRONES”**



Para acceder al título de:

Grado en Ingeniería de los Recursos Energéticos

Autor: Cristina Diego Soroa

Director/es: Julio Manuel de Luis Ruiz / Raúl Pereda García

Convocatoria: Febrero 2020

ÍNDICE

Capítulo I: Introducción.....	1
Capítulo II: Levantamiento mediante topografía clásica.....	17
Capítulo III: Levantamiento mediante fotogrametría con dron.....	59
Capítulo IV: Contraste de resultados.....	115
Capítulo V: Conclusiones.....	138
Capítulo VI: Referencias.....	141

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

1. OBJETO Y JUSTIFICACIÓN	4
1.1. OBJETO	4
1.2. JUSTIFICACIÓN	4
2. LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS	4
2.1. LEVANTAMIENTOS MEDIANTE MÉTODOS TOPOGRÁFICOS CLÁSICOS	5
2.1.1. Definición del Sistema de Referencia	5
2.1.2. Establecimiento de la Red Fundamental	6
2.1.2.1 Metodologías Clásicas	7
2.1.2.2 Metodologías GPS	10
2.1.4. Descripción del Instrumental	11
2.2. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS	12
2.2.1. Fotogrametría Clásica	12
2.2.2. Fotogrametría con Drones	13
2.2.3. Productos Derivados	13
2.2.3.1. Nubes de puntos	14
2.2.3.2. Modelos Digitales del Terreno y/o Elevaciones	14
2.2.3.3. Ortofotografías	14
3. MAGNITUDES OBJETO DEL CONTRASTE	15

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Número 1.1.- Esquema proyectivo de la UTM.....	5
Figura Número 1.2.- Red Geodésica Nacional en España.....	6
Figura Número 1.3.- Red Geodésica Nacional en Cantabria.....	6
Figura Número 1.4.- Datos incluidos en la reseña de un Vértice Geodésico.....	7
Figura Número 1.5.- Determinación de coordenadas planimétricas.....	8
Figura Número 1.6.- Determinación de coordenadas altimétricas.....	8
Figura Número 1.7.- Esquema general de una poligonal.....	8
Figura Número 1.8.- Esquema general de una intersección directa.....	9
Figura Número 1.9.- Esquema general de una intersección inversa.....	9
Figura Número 1.10.- Esquema general de una nivelación geométrica.....	10
Figura Número 1.11.- Estación Topográfica marca Leica, modelo TS02.....	11
Figura Número 1.12.- Equipo GPS, marca Leica, modelo 1200.....	12
Figura Número 1.13.- Nube de Puntos Explotación Minera.....	14
Figura Número 1.14.- Modelo Digital de Elevaciones Explotación Minera.....	14
Figura Número 1.15.- Ortofotografía Explotación Minera.....	15
Figura Número 1.16.- Objeto a utilizar en el contraste geométrico.....	16

1. OBJETO Y JUSTIFICACIÓN

1.1. OBJETO

El objeto principal de este trabajo es el estudio comparativo de un determinado objeto existente en el territorio utilizando los diferentes procedimientos para la realización de levantamientos topográficos. En primer lugar, realizando un levantamiento topográfico mediante métodos clásicos, utilizando una Estación Topográfica ET y en segundo lugar, mediante fotogrametría aérea, se realizará un vuelo con dron, obteniendo como resultado el modelo y su correspondiente ortoimagen a partir de las fotografías realizadas.

Dicho estudio surge de la necesidad de conocer las ventajas que ofrece esta nueva tecnología con respecto a los métodos clásicos, y muy especialmente el rango de precisiones que se obtiene con el avance tecnológico de los drones.

Los subobjetivos son:

- Conocer en profundidad la tecnología de los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV), también denominados drones, así como el posterior tratamiento de datos.
- Aplicar los conocimientos aprendidos en las asignaturas “Topografía y Geodesia” y “Topografía aplicada a la Ingeniería” en un caso real.
- Como conclusión final del estudio, a partir de los datos obtenidos mediante las distintas metodologías, se analizan aspectos de ambas como determinar si las mediciones de campo obtenidas con el dron son similares al de una estación topográfica, comparar y determinar cuál de los dos métodos de levantamiento topográfico es más económico, cuál de ellos requiere menor tiempo y si cumplen con la precisión requerida.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo tiene como fin aportar las ventajas que ofrece la fotogrametría con drones con respecto a las metodologías clásicas. Dado que la actividad de los drones se está extendiendo cada vez más en el ámbito de la ingeniería, más concretamente la fotogrametría con drones, y que no aparecen estudios claros en los cuales se indique que metodología es más precisa, surge la necesidad de comparar su efectividad con los métodos clásicos utilizados hasta ahora. Entre los usos más destacados, el dron se utiliza en topografía para medición de distancias, superficies y volúmenes, por ello, la realización del levantamiento se emplazará una zona industrial, donde las edificaciones ocupan grandes superficies y las distancias a medir son claras y de gran longitud. Con los resultados de ambas metodologías, se establecen una serie de ventajas e inconvenientes en los que difieren una de la otra, concluyendo en cuál de las dos es más adecuada para la realización del estudio.

2. LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS

Un levantamiento topográfico es el conjunto de operaciones ejecutadas sobre un terreno con los instrumentos adecuados para poder confeccionar una correcta representación

gráfica o plano, siendo la planimetría la parte del levantamiento en la que se logra la representación de la superficie terrestre sobre un plano horizontal, y la altimetría la parte que se encarga de posicionar verticalmente los puntos de un terreno.

Un levantamiento convencional puede realizarse por dos procedimientos diferentes:

- Por topografía clásica.
- Por fotogrametría.

2.1. LEVANTAMIENTOS MEDIANTE MÉTODOS TOPOGRÁFICOS CLÁSICOS

Las metodologías topográficas clásicas se fundamentan en captar información en un sistema de referencia, midiendo ángulos y distancias para su posterior representación mediante coordenadas.

2.1.1. Definición del Sistema de Referencia

La proyección cartográfica utilizada en España desde 1970 es la Proyección Universal Transversa de Mercator, ideada con el objetivo de elaborar mapas, planos y cartas de toda la superficie terrestre. La proyección se basa en proyectar desde el Centro de la Tierra (Proyección Gnomónica) todos los puntos de la superficie terrestre sobre un cilindro transverso a la tierra, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.

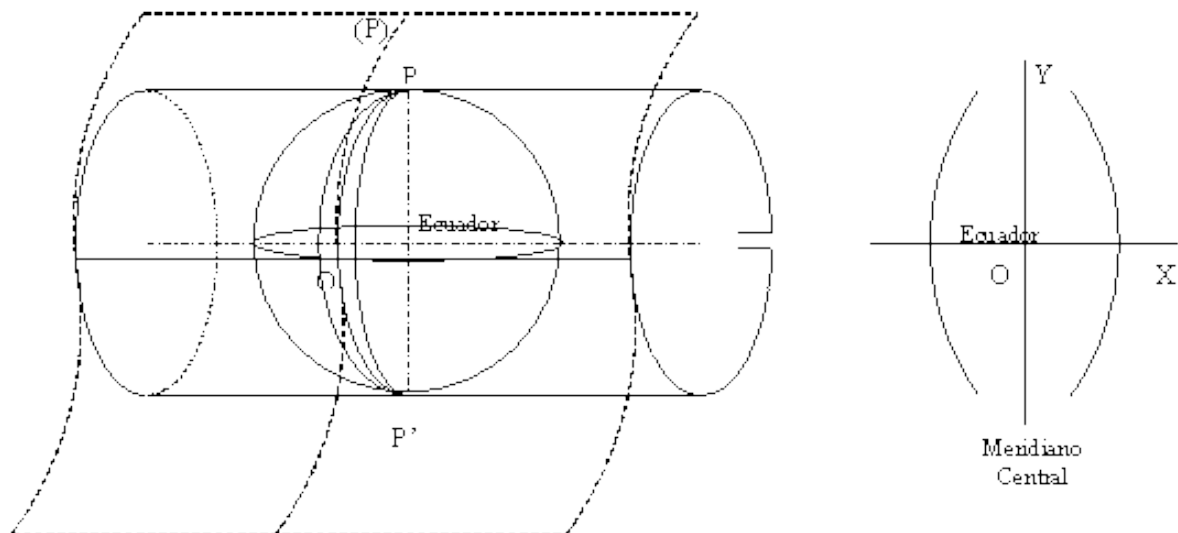


Figura Número 1.1.- Esquema proyectivo de la UTM / Fuente (ocw.unican.es)

Las coordenadas UTM determinan la ubicación exacta de un punto de la superficie terrestre, con respecto al sistema de coordenadas definido por la propia proyección y para fijar el Sistema de Referencia se hace necesario fijar el elipsoide de referencia. Hasta el año 2015 en España el Sistema de Referencia Oficial era European Datum 1950 (ED50) que trabajaba con el Elipsoide de Hayford y desde 2015 hasta la actualidad el sistema de referencia oficial pasó a ser European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) que utiliza el elipsoide Sistema de Referencia Geodésico 1980 (GRS80) que aparte de constantes geométricas se define por constantes físicas, además de ser prácticamente

idéntico a World Geodetic System 1984 (WGS84), utilizado por los modernos sistemas de posicionamiento global.[1]

2.1.2. Establecimiento de la Red Fundamental

Para determinar las coordenadas de la red de fundamental de vértices topográficos se parte de las redes de vértices geodésicos preexistentes en el territorio e implantadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), para todo tipo de usos.

La red geodésica es una macroestructura que está formada por cadenas de triángulos que cubren todo un amplio territorio. La red geodésica española está diferenciada en dos grandes bloques:

- Red de primer orden: con lados de triángulos de unos 50.000 m.
- Red de orden inferior: con lados de triángulos de 8.000 m.

En las siguientes figuras se puede apreciar dichas redes en contexto nacional y regional:

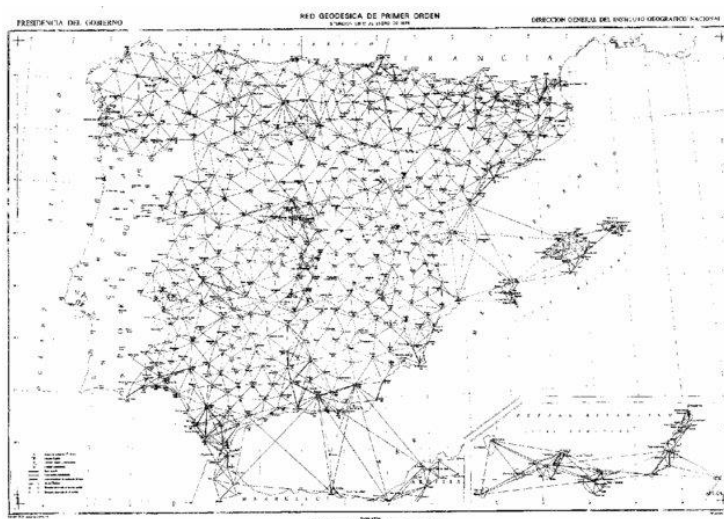


Figura Número 1.2.- Red Geodésica Nacional en España / Fuente (researchgate.net)



Figura Número 1.3.- Red Geodésica Nacional en Cantabria / Fuente (ocw.unican.es)

Esta red se encuentra materializada en el territorio por medio de vértices geodésicos, hitos de variada tipología, posicionados en lugares apropiados para lograr la intervisibilidad entre ellos y de los que se proporcionan los datos que se pueden apreciar en la siguiente figura:

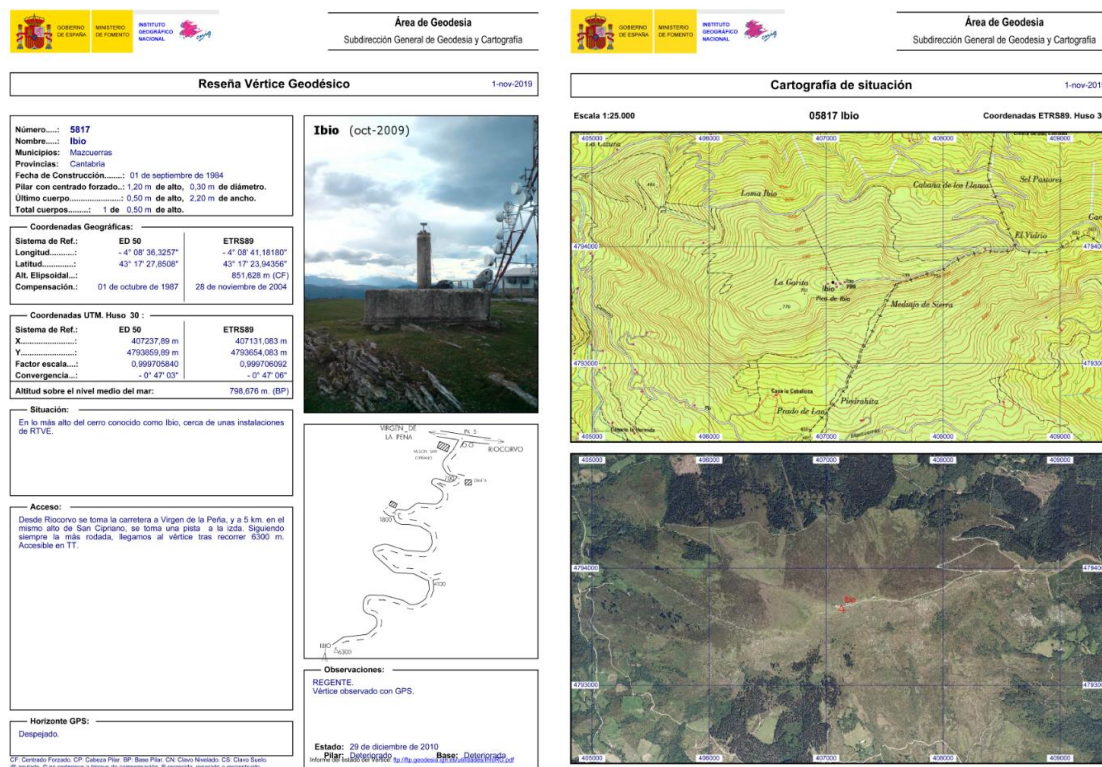


Figura Número 1.4.- Datos incluidos en la reseña de un Vértice Geodésico / Fuente (ign.es)

Para el correcto diseño de la Red Fundamental de vértices topográficos, partiendo de la Red Geodésica Nacional, se debe estudiar la localización óptima de los vértices topográficos, teniendo en cuenta la geometría de la propia red geodésica, la estabilidad del terreno y la correcta visualización del objeto o territorio a modelar. Una vez estudiada la ubicación óptima de la red de vértices topográficos se señala adecuadamente y posteriormente se procede a desarrollar las metodologías topo-geodésicas necesarias para la correcta definición de las coordenadas de todos los vértices topográficos, para lo que fundamentalmente existen dos metodologías.[2]

2.1.2.1 Metodologías Clásicas

Las metodologías utilizadas por topografía clásica para el establecimiento de coordenadas de vértices topográficas fundamentalmente son tres: Poligonales, Intersecciones Directas e Intersecciones inversas.

Partiendo de los clásicos posicionamientos con Estación Topográfica en los que se conocen las coordenadas de un punto estación A (x_A , y_A , z_A) y se deben obtener los clásicos observables, Ángulos Horizontales y Verticales, Distancias Geométricas, Alturas de Instrumento y Prisma, a un punto B del cual se pretende determinar sus coordenadas, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.

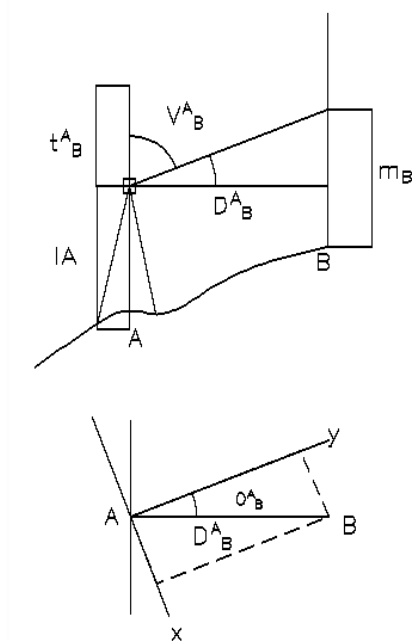


Figura Número 1.5.- Determinación de coordenadas planimétricas

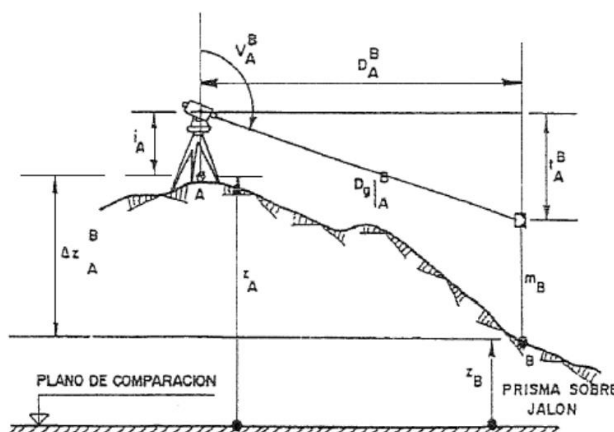


Figura Número 1.6.- Determinación de coordenadas altimétricas / Fuente (ocw.unican.es)

El método de Itinerario o Poligonal es una sucesión encadenada de radiaciones que tienen como uso de los objetivos más importantes establecer las estaciones necesarias para la determinación de los puntos radiados.

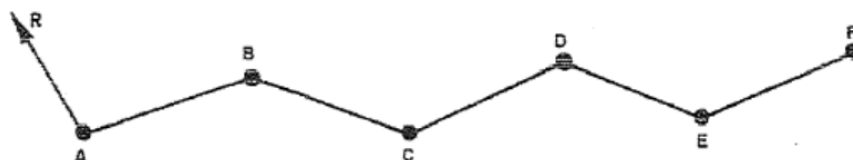


Figura Número 1.7.- Esquema general de una poligonal / Fuente (ocw.unican.es)

El método de Intersecciones directas y/o inversas al igual que el método de poligonal o itinerario son métodos planimétricos, pero en el caso de las intersecciones sólo se requiere de medidas de valores angulares. Si las observaciones se realizan estacionando en puntos

de posición conocida, visando entre ellos al que se pretende situar, se denomina intersección directa; por el contrario, si aquellas medidas se efectúan en el punto a determinar, observando desde él a los conocidos, la intersección se llama inversa.

En las intersecciones directas V es un punto cuya posición se desea conocer, y A y B dos vértices de coordenadas planimétricas conocidas. Las coordenadas del punto V pueden obtenerse a partir de las del A o a partir de las del B calculando la distancia y la orientación correspondientes, pero en realidad se consiguen por duplicado a partir de los dos puntos para poder tener comprobación de resultados. Es fundamental observar que de este modo sólo se comprueban los cálculos, pero no las observaciones de campo, pues unas observaciones de ángulos mal tomadas darán un punto V distinto al real pero perfectamente obtenible a través del proceso de cálculo. En la siguiente figura se puede apreciar el esquema de una intersección directa.

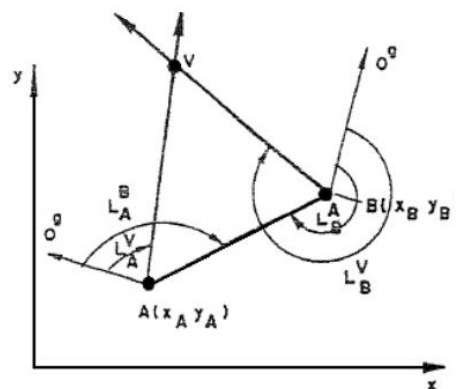


Figura Número 1.8.- Esquema general de una intersección directa / Fuente (ocw.unican.es)

Las Intersecciones Inversas consisten en la observación desde un vértice, cuyas coordenadas planimétricas se pretenden obtener de otros tres cuyas coordenadas planimétricas son dato (X_A, Y_A), (X_B, Y_B) y (X_C, Y_C). Las tres visuales PA, PB y PC proporcionan los datos necesarios para resolver matemáticamente el problema. El método de resolución es conocido por el método de Pothenot.

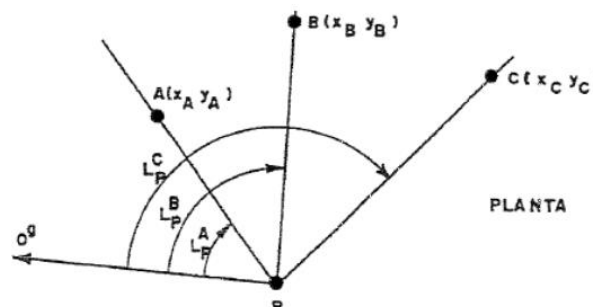


Figura Número 1.9.- Esquema general de una intersección inversa / Fuente (ocw.unican.es)

En el ámbito altimétrico se puede llevar a cabo la nivelación trigonométrica o la geométrica. La primera permite calcular el desnivel del punto B respecto al punto A, para lo que se hace necesario ubicar una Estación Topográfica en el punto de cota conocida y observar al de cota desconocida los siguientes observables: ángulo cenital, distancia reducida, altura de instrumento y jalón, tal y como se puede apreciar en las figuras 5 y 6.

La nivelación geométrica permite calcular el desnivel existente entre el punto B respecto al punto A se estaciona el nivel y se realizan dos lecturas a las estadias verticales, tal y como se aprecia en la siguiente figura. Se debe destacar que esta metodología es muy lenta y por tanto costosa pero es muy precisa y dependiendo de la precisión altimétrica exigida puede convertirse en la única metodología posible. [1]

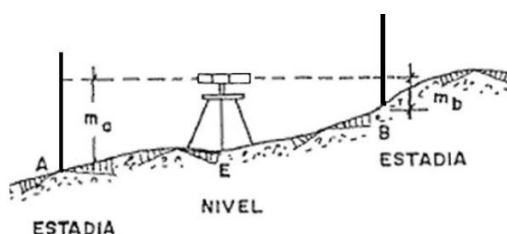


Figura Número 1.10.- Esquema general de una nivelación geométrica / Fuente (ocw.unican.es)

2.1.2.2 Metodologías GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System), y originalmente Navstar GPS, es un sistema que permite determinar en toda la Tierra la posición de cualquier objeto (una persona, un vehículo) con una precisión de hasta centímetros de precisión. El sistema fue desarrollado, instalado y empleado por el Departamento de Defensa de los EEUU.

El GPS funciona mediante una red de como mínimo 24 satélites en órbita sobre el planeta Tierra, a aproximadamente 20.000 km de altura, con órbitas distribuidas para que en todo momento haya al menos 4 satélites visibles en cualquier punto de la tierra. Las metodologías GPS se apoyan en el uso exclusivo de éstos equipos y se puede trabajar con diferentes métodos:

- Método Estático Relativo Estándar: Se trata del clásico posicionamiento para la medida de distancias con gran precisión ($5\text{mm} + 1\text{ppm}$) en el que dos o más receptores se estacionan y observan durante un periodo mínimo de media hora, una o dos (o más), según la redundancia y precisión necesarias, y en función de la configuración de la constelación local y distancia a observar. Los resultados obtenidos pueden alcanzar precisiones muy altas, hasta niveles milimétricos. Este método es el empleado para medir distancias mayores de 20 kilómetros con toda precisión.
- Método Estático Relativo Rápido: Es una variante del Método Estático Relativo Estándar. De esta forma se reducen los periodos de observación hasta 10 o 15 minutos por estación, manteniendo los mismos ordenes de precisión que para el método Estático ($5\text{mm}-10\text{mm} + 1\text{ppm}$). Utiliza un algoritmo para la resolución estadística de las ambigüedades, que permite la disminución de los tiempos de observación, por el contrario, tiene la limitación en las distancias a observar, menores de 20 kilómetros. El método destaca por su rapidez, sencillez y eficacia.

2.1.3. Establecimiento de la Red de Relleno

Para obtener la red de relleno, que define pormenorizadamente el objeto/terreno que se pretende modelizar se utiliza Estación Topográfica sin prisma y el método de relleno o radiación. La radiación es un método topográfico que permite determinar la posición de un punto respecto a otro a través de mediciones angulares y de distancia.

Se conocen las coordenadas de un punto A (X_A , Y_A , Z_A) y el ángulo que forma la dirección del eje de ordenadas en A y la dirección AR, siendo R una referencia materializada en el terreno y visible desde A (bien directamente o bien situando en ella algún elemento auxiliar de puntería). Se trata de conocer las coordenadas X_B , Y_B , Z_B de un punto B, visibles desde A, a través de medidas angulares L_{AR} , L_{AB} y V_{AB} y medida de distancias, ya sea la distancia geométrica o la distancia reducida en cada caso.

2.1.4. Descripción del Instrumental

El instrumento principal del estudio es una estación topográfica (ET), se trata de un equipo compacto que tiene los elementos precisos para evaluar con una puntería única los ángulos horizontal y vertical y la distancia. Además de ello realiza tareas computacionales mediante un microprocesador integrado (evaluación de la distancia reducida, cálculo de las coordenadas, determinación de los desniveles, etc.). El instrumento puede ser capaz de almacenar datos, tanto en una unidad de memoria interna como en un registrador exterior fácilmente acoplable. Cabe reseñar que este instrumento es capaz de medir distancias de hasta 800 metros sin prisma, lo que le hace ideal para el caso que se plantea, dado que la mayor parte de los puntos que definen el objeto que se pretende modelar son de muy difícil acceso.

En este caso se trata de la estación total de marca Leica TS02, con su correspondiente trípode, prisma y jalón. A continuación, se muestra la estación empleada.



Figura Número 1.11.- Estación Topográfica marca Leica, modelo TS02 / Fuente (geobax.com)

En el caso de los posicionamientos con técnicas GPS, cuando se desea determinar la posición tridimensional, el receptor que se utiliza para ello localiza automáticamente como mínimo cuatro satélites de la red, de los que recibe unas señales indicando la

identificación y hora del reloj de cada uno de ellos, además de información sobre la constelación. Con base en estas señales, el aparato sincroniza su propio reloj con el tiempo del sistema GPS y calcula el tiempo que tardan en llegar las señales al equipo, y de tal modo mide la distancia al satélite. Mediante el método de trilateración inversa, computa su propia posición. Da también una gran exactitud en el tiempo, basado en los relojes atómicos a bordo cada uno de los satélites y en el segmento terreno de GPS.



Figura Número 1.12.- Equipo GPS, marca Leica, modelo 1200 / Fuente (estaciontotal.es)

Se debe reseñar que todos los equipos son propiedad del Grupo de I+D+i “Ingeniería Cartográfica y Explotación de Minas” del Departamento de Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica de la Universidad de Cantabria, al que corresponden los tutores de este Trabajo Fin de Grado.

2.2. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS

A pesar de que la fotogrametría no es una ciencia reciente, las aplicaciones surgidas del uso de sensores fotogramétricos montados sobre vehículos aéreos no tripulados UAV's, están causando una gran involución tecnológica. Las metodologías fotogramétricas consisten en la captura de información de forma global mediante un vuelo fotogramétrico, permitiendo levantar partes del territorio mediante fotografías aéreas del mismo.

2.2.1. Fotogrametría Clásica

La fotogrametría tiene por objeto obtener la representación de un objeto/territorio de forma tridimensional basándose en fotografías del modelo/terreno que se trata de levantar, con lo que se evita buena parte del trabajo de campo. Las operaciones necesarias para llevar a efecto la transformación del sistema proyectivo, de cónico en acotado, reciben el nombre de restitución, y así se dice restituir varias fotografías a la representación del objeto/terreno en ellas fotografiado previas las medidas, observaciones o cálculos necesarios.[3]

Existen varias formas de hacer fotogrametría:

- Fotogrametría aérea: Cuando las tomas fotográficas se hacen desde el cielo. Se aplica para la elaboración de planos y/o mapas para el desarrollo de proyectos de ingeniería.

- Fotogrametría analógica: Se lleva a cabo mediante procesos geométricos y mecánicos. Constituyó la primera técnica para llevar a cabo fotogrametría, aunque actualmente se encuentra en desuso.
 - Fotogrametría analítica: Se lleva a cabo mediante la aplicación de algoritmos matemáticos que relacionan las coordenadas terreno con las coordenadas del fotograma. Se desarrolló después de la fotogrametría analógica y actualmente se sigue utilizando en determinados casos.
 - Fotogrametría digital: Con la aparición de los ordenadores, se sustituye la imagen analógica por la imagen digital, del mismo modo que se empiezan a utilizar programas informáticos. En la actualidad la fotogrametría digital convive con la analítica.
- Fotogrametría terrestre: En este caso las tomas fotográficas se hacen desde el suelo y los principios son los mismos que los utilizados en la fotogrametría aérea.

2.2.2. Fotogrametría con Drones

Los drones o vehículos aéreos no tripulados pueden ir equipados con muchos sensores y entre ellos se encuentran las cámaras fotográficas digitales, cuando se les equipa con estos sensores permiten realizar tomas a partir de las cuales llevar a cabo el proceso de obtención cartográfica descrito en el apartado anterior. Los drones en fotogrametría vienen a cubrir las funciones del avión que porta la cámara y permiten realizar vuelos de grandes extensiones de terreno en poco tiempo y con niveles de precisión óptimos. La limitación legislativa que actualmente tienen los drones relativa a la altura de vuelo (120 m.) genera una limitación de superficie que vuela en cada pasada, pero tienen la ventana del nivel de detalle que pueden llegar a alcanzar las tomas fotográficas.

Actualmente los drones utilizan Cámaras Digitales lo que supone que el tipo de técnica a utilizar con el producto derivado de una observación con Dron es la Fotogrametría Digital. En un proceso que permite la generación de Modelo Digital de Elevaciones, habitualmente denominado Modelo Digital del Terreno, y que habitualmente no se restituye por el elevado coste temporal y económico que conlleva, lo que en definitiva supone que no hay un plano de restitución clásico. Es decir, las imágenes captadas por las cámaras del dron son procesadas mediante programas y herramientas específicas que permiten obtener nubes de puntos más o menos densas (incluso millones de puntos) que son un fiel reflejo de la realidad.

A partir de dichas nubes de puntos se pueden obtener modelos digitales de elevaciones (MDE) también denominados modelos digitales del terreno (MDT), aunque un MDT sea la concreción de un MDE. Además, las imágenes se pueden georreferenciar y escalar, obteniendo las clásicas ortofotografías, cuya representación puede llegar a ser más representativa y menos simbólica incluso que la cartografía convencional.[4]

2.2.3. Productos Derivados

Con el conjunto de tomas fotográficas recogidas en campo se puede exportar a software especializados capaces de realizar procesamientos topográficos y fotogramétricos y el

posterior tratamiento de éstos, creando una nube de puntos con coordenadas (x, y, z), un modelo digital del terreno y ortoimágenes.

2.2.3.1. Nubes de puntos

Como se ha descrito anteriormente a partir de las tomas fotográficas y el procesado mediante software específico permite la generación de nubes de puntos que permiten caracterizar el territorio o el objeto se pretende representar. Tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.

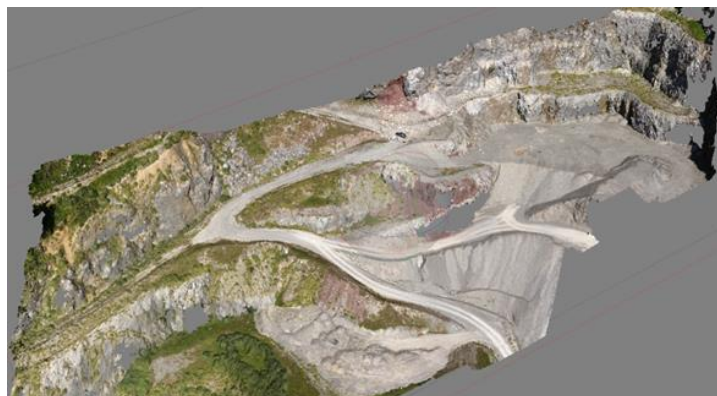


Figura Número 1.13.- Nube de Puntos Explotación Minera

2.2.3.2. Modelos Digitales del Terreno y/o Elevaciones

Constituida la nube de puntos se suele generar un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en el que la variable modelizada es la altura o cota, obteniéndose por tanto una estructura numérica de datos que representa una variable cuantitativa y de distribución continua. Generado el modelo digital de elevaciones es usual obtener las curvas de niveles representativas con la equidistancia deseada. Se debe destacar que para generar MDE y curvas de nivel representativas no es necesario un software tan específico como para generar la nube de puntos. En la siguiente figura se puede apreciar un MDE con sus curvas características.

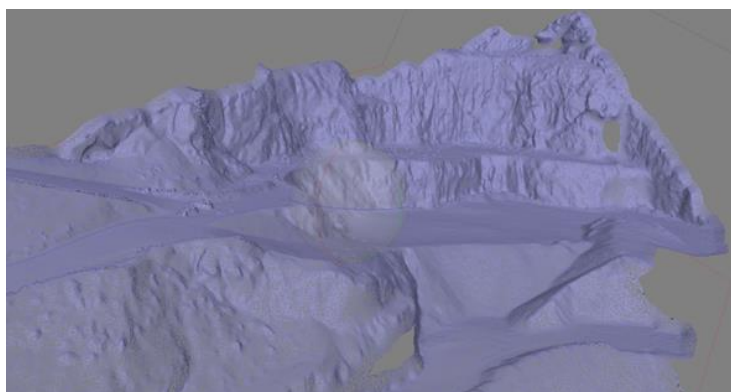


Figura Número 1.14.- Modelo Digital de Elevaciones Explotación Minera

2.2.3.3. Ortofotografías

Las ortofotografías son fotografías con escala constante y propiedades de una proyección ortogonal, formada a partir de una fotografía en proyección central mediante rectificación

diferencial. Las ortografías mantienen toda la información de la fotografía y permiten además la medición a escala tanto de distancias como de superficies lo cual permite, que pueda ser combinado con información cartográfica.

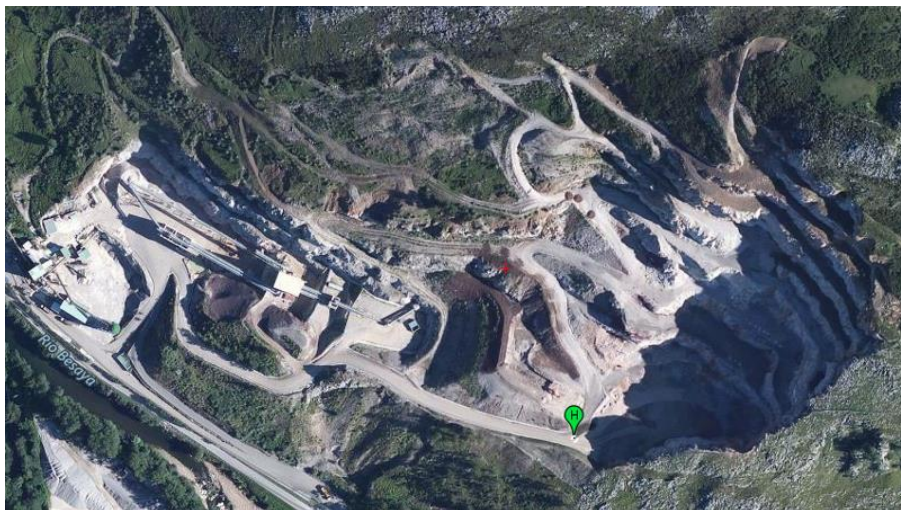


Figura Número 1.15.- Ortofotografía Explotación Minera

3. MAGNITUDES OBJETO DEL CONTRASTE

Después de una profunda revisión bibliográfica se ha comprobado que aunque la técnica de obtención de modelos de representación territorial o de objetos está plenamente desarrollada, no existe un contraste claro en la precisión que se puede llegar a alcanzar en representación de objetos 3D con una marcada componente altimétrica y como afecta a las mediciones derivadas del propio modelo.

Es por ello que este trabajo fin de grado plantea un contraste entre el modelo que se puede obtener con una Estación Topográfica (Técnica actualmente validada y consolidada) y con un DRON (Técnica de reciente aparición y por tanto sin validar). Las magnitudes objeto del contraste serán aquellas cuyos datos se pueden obtener de los productos anteriores y que básicamente se reducen a Distancias, Ángulos, Alturas, Superficies, Volúmenes y Posicionamientos Globales.

El contraste persigue por tanto cuantificar las diferencias entre las magnitudes que se pueden obtener un modelo digital en el que se represente un objeto de grandes dimensiones obtenido mediante Levantamiento Topográfico por Técnicas Clásicas y el Modelo Digital del Terreno/Ortofotografía. Finalmente se pretenden con las diferencias obtenidas, modelizar los resultados, determinar métodos de control dentro de los propios levantamientos y además validar la técnica basada en el uso de drones para modelar objetos de las características previamente establecidas.

Es por ello que la elección del objeto a modelizar es fundamental para que cubra las necesidades que se imponen en el contraste:

- Ser un objeto de grandes dimensiones en el territorio.
- Que tenga una marcada componente altimétrica.

- Que sobre dicho objeto se puedan realizar mediciones de diferentes magnitudes y con diferentes rangos.

En este sentido el objeto elegido es una nave industrial situada en el polígono de Tanos-Viérnoles, concretamente la nave de Agro Cantabria, en la que tal y como se puede apreciar en la imagen siguiente cumple todos los requisitos definidos anteriormente.



Figura Número 1.16.- Objeto a utilizar en el contraste geométrico / Fuente (cantabrialiberal.com)

La elección de esta se debe a su compleja geometría formado por varias torres a distintas alturas, así como tejados planos e inclinados lo cual genera que las medias que se puedan realizar sean de gran interés para el contraste objeto de este trabajo fin de grado.

CAPÍTULO II: LEVANTAMIENTO MEDIANTE TOPOGRAFÍA CLÁSICA

ÍNDICE

1. TOPOGRAFÍA	21
1.1. IMPORTANCIA DE LA TOPOGRAFÍA	21
1.2. TOPOGRAFIA EN LA INGENIERÍA	21
1.3. DIVISIÓN DE LA TOPOGRAFÍA	21
1.3.1. Planimetría	21
1.3.2. Altimetría	22
1.4. LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS	22
2. INSTRUMENTOS TOPOGRÁFICOS	22
2.1. EVOLUCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS TOPOGRÁFICOS	22
2.2. MEDIDAS ANGULARES	23
2.2.1. Goniómetro	23
2.2.1.1. Descripción general de un goniómetro	23
2.2.1.2. Partes de un goniómetro	25
2.2.2. Teodolito óptico	25
2.2.2.1. Partes esenciales teodolito óptico	25
2.2.2.2. Clasificación de los teodolitos ópticos	27
2.2.2.3. Parámetros representativos de un teodolito	27
2.2.3. La brújula	28
2.2.3.1. Tipos de brújulas	29
2.2.3.2. Aplicaciones topográficas	29
2.2.4. Teodolito electrónico	30
2.2.4.1. Medición electrónica de ángulos	30
2.2.4.2. Sistemas de evaluación de ángulos	30
2.3. MEDIDAS DISTANCIOMÉTRICAS	31
2.3.1. Medida directa de distancias	31
2.3.1.1. Cintas métricas y reglas	31
2.3.1.2. Reglas o reglones	32
2.3.1.3. Hilos ínvar	32
2.3.2. Medida indirecta de distancias por métodos estadimétricos	33
2.3.3. Medida indirecta de distancias por métodos electromagnéticos	35
2.4. ESTACIÓN TOPOGRÁFICA	37
2.4.1. Aspectos previos	37
2.4.2. Partes principales de una ETT	38

2.4.3. Las estaciones topográficas en la actualidad	39
3. MODELOS DIGITALES DEL TERRENO	40
3.1. CONCEPTO DE MODELO.....	40
3.2. TIPOLOGÍA DE MODELOS	41
3.3. DEFINICIÓN MODELO DIGITAL DEL TERRENO.....	41
3.4. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES	41
3.5. ORIGEN DE LOS MDT	42
3.6. MODELOS DIGITALES Y MODELOS ANALÓGICOS	42
3.7. TIPOS DE MDT.....	43
3.7.1. Modelos vectoriales.....	43
3.7.1.1. Modelo de contornos	44
3.7.1.2. Red de triángulos irregulares	44
3.7.1.3. Almacenamiento de datos vectoriales.....	44
3.7.2. Modelos ráster o teselar	46
3.7.2.2. Matrices de resolución variable	47
3.7.2.3. Almacenamiento de datos ráster.....	47
4. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CON ETT.....	49
4.1. EMPLAZAMIENTO.....	49
4.2. PLANIFICACIÓN	49
4.3. RECONOCIMIENTO DE LA ZONA	49
4.4. DISEÑO DE LA RED	50
4.4.1. Metodología empleada	50
4.4.2. Material utilizado	51
4.5. OBSERVACIÓN DE LA RED	51
4.5.1. Trabajos de campo con gps.....	51
4.5.2. Cálculo de los datos gps.....	52
4.5.3. Trabajos de campo con estación topográfica	53
4.5.4. Cálculo de los datos topográficos	54
4.6. GENERACIÓN DEL MDT	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Número 2.1.-Ángulos en el plano horizontal.....	23
Figura Número 2.2.-Ángulos en el plano vertical.....	24
Figura Número 2.3.- Ejes de un goniómetro.....	25
Figura Número 2.4.- Teodolito óptico.....	26
Figura Número 2.5.-Partes principales de una brújula.....	28
Figura Número 2.6.-Brújula.....	29
Figura Número 2.7.-Codificadores rotatorios incremental y absoluto.....	30
Figura Número 2.8.-Sistema dinámico.....	31
Figura Número 2.9.-Cinta de fibra.....	32
Figura Número 2.10.-Cinta topográfica metálica.....	32
Figura Número 2.11.-Fundamento de medida estadimétrica de distancias.....	33
Figura Número 2.12.-Estadía horizontal invar.....	34
Figura Número 2.13.- Trazos del anteojo.....	34
Figura Número 2.14.-Telurómetro.....	36
Figura Número 2.15.-Geodímetro.....	36
Figura Número 2.16.-Partes principales de una ETT.....	38
Figura Número 2.17.-Medición con ETT en alzado.....	39
Figura Número 2.18.-Teclado de una ETT.....	40
Figura Número 2.19.-Modelo Digital del Terreno (MDT)	42
Figura Número 2.20.-Definición arcos, nodos y polígonos.....	44
Figura Número 2.21.-Modelo Ráster.....	46
Figura Número 2.22.-Enumeración Exhaustiva.....	47
Figura Número 2.23.-Órdenes de almacenamiento simple.....	48
Figura Número 2.24.-Secuencia estructura quadtree.....	48
Figura Número 2.25.-Numero matricial de Morton.....	48
Figura Número 2.26.-Polígono de Tanos- Viérnoles, Torrelavega.	49
Figura Número 2.27.-Ubicación de las bases de referencia.....	52
Figura Número 2.28.-Toma de datos con ETT.....	53
Figura Número 2.29.-Tipología de campo.....	55
Figura Número 2.30.-Separación de campos.....	55
Figura Número 2.31.-Tipo de formato.....	56
Figura Número 2.32.-Códigos y coordenadas del levantamiento.....	57
Figura Número 2.33.-Estructura alámbrica del modelo.....	58
Figura Número 2.34.-Modelo nave Agro Cantabria.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla Número 2.1.-Comparación propiedades MDT Y MAT.....	43
Tabla Número 2.2.-Estructuras más utilizadas para el almacenamiento de los MD.....	43
Tabla Número 2.3.-Topología de polígonos.....	45
Tabla Número 2.4.-Topología de nodos.....	45
Tabla Número 2.5.-Topología de arcos.....	45
Tabla Número 2.6.-Coordenadas de los arcos.....	46

1. TOPOGRAFÍA

La topografía se define como el conjunto de técnicas y métodos que tienen por objeto determinar la forma y dimensiones de un terreno, representándolo gráficamente en plano o mapa con los accidentes naturales y artificiales y su posición relativa: planimétrica (x, y) y altimétrica (z).

1.1. IMPORTANCIA DE LA TOPOGRAFÍA

Para un estudio de Ingeniería es necesario utilizar la información contenida en los mapas o planos. Esto se debe a que cualquier Ingeniería (Minas, Caminos, o Industrial) incide de una forma muy activa en el proyecto, construcción y control de una obra o instalación, en las cuales, el plano es un soporte fundamental para el trabajo.

El objetivo fundamental de la Topografía es la medición de ángulos y distancias con aparatos adecuados y, utilizando métodos apropiados, determinar los posicionamientos en la doble vertiente:

- Captar información en el terreno y después del trabajo en gabinete, posicionarlo en un plano o mapa.
- Realizar un análisis de la geometría en gabinete y posteriormente posicionar los puntos en el terreno.

1.2. TOPOGRAFIA EN LA INGENIERÍA

La Topografía tiene una gran importancia en la ingeniería, tanto en Ingeniería Minera como Civil o Industrial. La mayor parte de la actividad profesional está enfocada hacia la realización de proyectos y ejecución de obras siendo la Topografía un papel de extraordinaria importancia, sustentada en las fases siguientes:

- Captura de la información geográfica a escalas convenientes.
- Manejo de la cartografía existente.
- Definición geométrica de la obra.
- Replanteo planimétrico y altimétrico de cualquier eje.
- Control, ejecución y medición de la obra.

1.3. DIVISIÓN DE LA TOPOGRAFÍA

En función de las operaciones a ejecutar para la representación del terreno, la topografía se divide en: planimetría y altimetría.

1.3.1. Planimetría

Es la posición de los puntos y su proyección sobre un plano horizontal. Se define planimetría a la parte del trabajo topográfico que determina la situación de los puntos del terreno en el plano XY.

La planimetría estudia los puntos de la superficie terrestre para proyectarlos sobre un plano horizontal, llamado plano de referencia. Para representar un punto en un plano, es decir, en un espacio bidimensional, es necesario establecer un sistema de referencias que nos sitúe los puntos medidos respecto a un origen común.

1.3.2. Altimetría

La altimetría determina las diferencias de nivel existentes entre puntos del terreno. Para determinar estas diferencias de nivel, es preciso la medida de distancias verticales, tanto directa o indirectamente. Esta medición se realiza mediante operaciones llamadas nivelación.

Las alturas de los trabajos topográficos, están referidas a un plano común de referencia. Este plano llamado de comparación es una superficie plana imaginaria, cuyos puntos se asumen con una elevación o altura de cero. Se denomina cota, elevación o altura de un punto determinado de la superficie terrestre a la distancia vertical que existe desde el plano de comparación hasta dicho punto.

Este plano de comparación es el nivel medio del mar, el cual se establece mediante observaciones realizadas con un mareógrafo a través de un largo periodo de años.

El plano de comparación no es necesariamente el nivel medio del mar, el operador elige un plano de comparación de forma que todas las cotas resulten positivas para facilitar los cálculos.

1.4. LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS

Un levantamiento topográfico es un conjunto de operaciones necesarias para representar un terreno, siendo la planimetría la parte del levantamiento en la que se logra la representación de la superficie terrestre sobre un plano horizontal, y la altimetría la parte que se encarga de posicionar verticalmente los puntos de un terreno. [1]

Un levantamiento topográfico puede ser:

- Levantamiento convencional: se utilizan aparatos y métodos adecuados según la calidad del trabajo exigida.
- Levantamiento no convencional: el caso contrario.

2. INSTRUMENTOS TOPOGRÁFICOS

2.1. EVOLUCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS TOPOGRÁFICOS

Los instrumentos topográficos han evolucionado de forma avanzada en los últimos 20 años. Hasta los años 80 se utilizaron las brújulas, los teodolitos y los taquímetros casi exclusivamente. Estos instrumentos son óptico-mecánicos, utilizados en la medida de ángulos y distancias, y están basados en giros y movimientos de círculos graduados combinados con un anteojo para visar el objeto. Estos instrumentos, junto con mediciones en elementos auxiliares como las miras, no permitían alcances largos, y la precisión en la estimación de distancias era baja. A principios de los años 80 surgieron los distanciómetros. Los distanciómetros son instrumentos auxiliares que se acoplaban a los taquímetros basados en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas generadas en el propio instrumento y que medían la distancia con precisiones de cm y alcances de varios km. Al poco tiempo, estos aparatos se compactaron en un único instrumento de medida angular (el teodolito o taquímetro) más el instrumento para medir distancias (distanciómetro), constituyendo las estaciones totales, que siguen vigentes hoy en día.

Posterior a las estaciones totales, surgieron los GPS, fue una gran revolución aunque al principio tenían precios muy elevados e incertidumbre en las medidas pero hoy en día son imprescindibles. Se debe distinguir entre el GPS del tipo navegador, y el GPS de tipo geodésico o topográfico, distinguiéndose del anterior en que son aparatos y configuraciones mucho más precisas y sofisticadas. Por último, la última generación de instrumentos topográficos la constituyen los escáneres basados en laser, que realizan una medición simultánea de las tres coordenadas del objeto, y por tanto pueden ser utilizados desde el aire, para obtener un modelo digital de elevaciones del terreno de gran exactitud; o desde tierra, para levantamientos de elementos detallados.[5]

2.2. MEDIDAS ANGULARES

2.2.1. Goniómetro

Un goniómetro es un instrumento que evalúa los ángulos necesarios en el terreno para realizar los trabajos topográficos. Entre las variedades angulares, los ángulos contenidos en el plano horizontal y los ángulos en el plano vertical son los más sencillos de tratar.

2.2.1.1. Descripción general de un goniómetro

El esquema general de un goniómetro se ajusta a las funciones a desarrollar, debiendo disponer de elementos para estacionar, referenciar y evaluar los ángulos. Los ángulos en el plano horizontal tienen diferentes denominaciones según el origen que se considere.

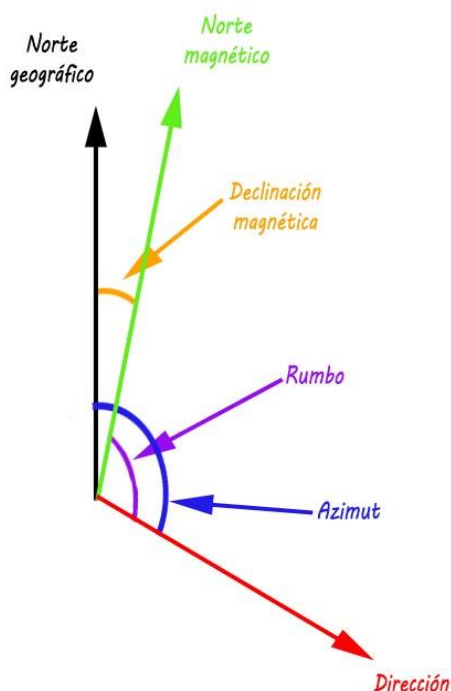


Figura Número 2.1.-Ángulos en el plano horizontal / Fuente (encorda2.com)

- Acimut topográfico (θ_1^A): Es el ángulo horizontal determinado por las direcciones de la meridiana geográfica (N) y la visual considerada.

- Acimut geodésico (G_1^A): Es el ángulo horizontal determinado por las direcciones de la meridiana geográfica (S) y la visual considerada.
- Rumbo (R_1^A): Es el ángulo horizontal determinado por las direcciones de la meridiana magnética (NM) y la visual considerada.
- Orientación (T_1^A): Es el ángulo horizontal determinado por las direcciones al eje de ordenadas de la cuadrícula (NC) y la visual considerada.
- Lectura (L_1^A): Es el ángulo horizontal determinado por las direcciones de una visual origen cualquiera y la visual considerada.

Al igual que estos, los ángulos en el plano vertical tienen diferentes denominaciones según el origen adoptado.

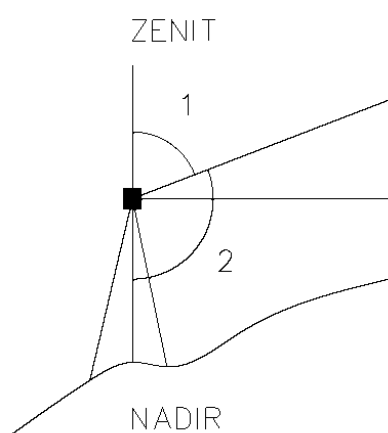


Figura Número 2.2.-Ángulos en el plano vertical

- Ángulo vertical o altura (α_1^A), (α_2^A): ángulo que forma el plano horizontal con la visual. Será de elevación o de depresión según que la visual sea ascendente o descendente.
- Ángulo cenital (V_1^A), (V_2^A): ángulo que forma la vertical ascendente con la visual considerada.
- Ángulo nadiral (β_1^A), (β_2^A): ángulo que forma la vertical 90 descendente con la visual que se considera.

Al obtener los ángulos queda determinada la semirrecta en el espacio en la que se encuentra el punto referenciado.

Los goniómetros se clasifican dependiendo de la capacidad de medición de ángulos de la siguiente forma:

- Completos: evalúan los ángulos en el plano horizontal y los ángulos en el plano vertical.
- Acimutal: evalúan los ángulos en el plano horizontal.
- Eclímetro: evalúan los ángulos en el plano vertical, expresando el resultado en grados sexagesimales o centesimales.
- Clisímetro: evalúa los ángulos en el plano vertical, expresando el valor de su pendiente en tanto por ciento.

2.2.1.2. Partes de un goniómetro

Las tres partes fundamentales del goniómetro se articulan en torno a tres ejes perpendiculares entre sí, siendo estos los siguientes:

- Eje principal: Es el eje vertical del aparato materializado por el calado de la plataforma nivelante, este, debe colocarse coincidente con la vertical del lugar.
- Eje secundario o de muñones: Por construcción es normal al eje principal. Alrededor de él gira el anteojo.
- Eje de colimación: Es la recta que une el centro óptico del objetivo con el centro de la cruz filar del retículo.

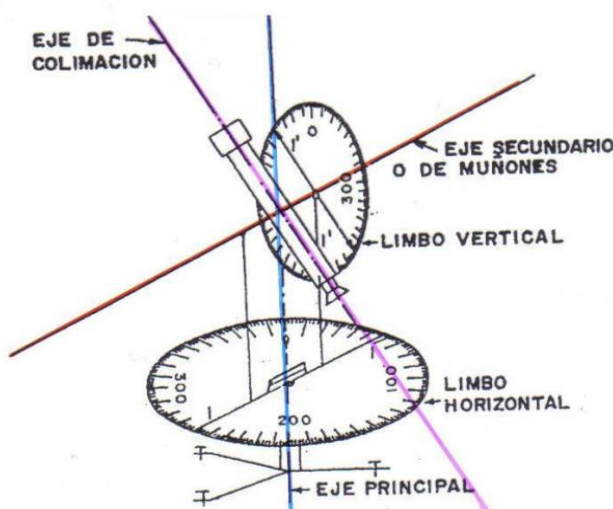


Figura Número 2.3.- Ejes de un goniómetro / Fuente (ocw.unican.es)

- Anteojo o colimador: Sirve para realizar la puntería según el eje de colimación. Tiene posibilidad de movimiento en torno al eje secundario o de muñones.
- Alidada: Elemento móvil que arrastra al anteojo. Tiene libertad de giro en torno al eje principal.
- Limbos: Discos graduados para evaluar los valores de los ángulos en el plano horizontal y en el plano vertical.

Los elementos descritos anteriormente se mueven en torno a los tres ejes fundamentales, permitiendo hacer puntería a cualquier punto y leer ángulos tanto en el plano vertical como en el horizontal.

2.2.2. Teodolito óptico

2.2.2.1. Partes esenciales teodolito óptico

Uno de los aparatos medidores de ángulos más perfeccionado es el teodolito.



Figura Número 2.4.- Teodolito óptico / Fuente (archiexpo.es)

En él se pueden diferenciar las siguientes partes:

- Plataforma nivelante; mediante tres tornillos permite la nivelación del aparato consiguiendo que el eje principal del teodolito coincida con la dirección de la vertical del lugar.
- Eje solidario del limbo acimutal; con un tornillo de presión, permite efectuar el movimiento del limbo, independientemente del anteojo
- Eje solidario con la alidada horizontal; con tornillos de presión y coincidencia, consiguiendo el giro sobre el eje, denominándose movimiento particular de la alidada.
- Soporte giratorio del anteojo; soporte del anteojo giratorio alrededor de un eje horizontal, arrastrando en su giro a la alidada cenital, disponiendo de tornillos de presión y coincidencia. Este giro es el movimiento del eclímetro o alidada cenital.

Existen movimientos compatibles que permiten posicionar un punto angularmente de las formas siguientes.

- Al fijar el movimiento general del limbo horizontal y liberar el tornillo de la alidada acimutal, el giro acimutal del anteojo se puede evaluar como diferencia de lecturas.
- Al fijar el movimiento de la alidada horizontal y liberar el general del limbo permite orientar el aparato, pudiendo posicionar una lectura cualquiera del limbo acimutal en una dirección preestablecida.
- En el tercer movimiento, al girar el anteojo sobre el eje horizontal, desplaza la alidada vertical, variando la lectura y evaluando la inclinación del anteojo.

Los teodolitos disponen de uno o dos niveles, colocados sobre los muñones del eje horizontal, sobre la alidada acimutal, sobre el eclímetro y sobre el anteojo.

Un teodolito debe ser un goniómetro que permita efectuar la vuelta de campana, pudiendo hacer observaciones con el anteojo a la derecha del eclímetro, posición normal (lectura en círculo directo: CD) o con el anteojo a la izquierda del eclímetro, posición invertida (lectura en círculo inverso: CI).

Para que un teodolito puede realizar la vuelta de campana y así efectuar la captura adecuada de ángulos, debe reunir las siguientes condiciones:

- El eje principal del aparato y el eje de la alidada acimutal deben coincidir. La falta de coincidencia se denomina torcedura de eje.
- El eje principal del aparato debe coincidir con la vertical del lugar. Todos los niveles estarán calados para asegurar esta circunstancia.
- El eje de colimación ha de ser normal al secundario, por lo que, al girar el anteojo, el de colimación debe describir un plano perpendicular al eje de muñones.
- El eje principal ha de ser normal al secundario pues, en caso contrario, el plano que describe el de colimación no sería vertical.
- En visuales horizontales, el eclímetro ha de marcar 0g (0°) ó 100g (90°), según el tipo.
- Los limbos han de estar bien graduados y dispuestos en planos normales a los ejes correspondientes (el acimut con el eje vertical y el eclímetro con el eje secundario).

2.2.2.2. Clasificación de los teodolitos ópticos

Dependiendo del tipo de precisión del movimiento, los teodolitos ópticos pueden ser:

- Repetidores: teodolitos provistos de tornillos de precisión y de coincidencia acimutales–
- Reiteradores: teodolitos provistos únicamente del tornillo de presión acimutal, careciendo del de coincidencia.

2.2.2.3. Parámetros representativos de un teodolito

Entre los parámetros que regulan los errores sistemáticos de un teodolito se encuentran los siguientes:

- Sensibilidad del nivel

Este parámetro evalúa la coincidencia entre la dirección del eje principal del aparato y la vertical del lugar, una vez que el nivel tórico, el de precisión, se encuentra calado.

Para ello es necesario una visual horizontal en la dirección de dos tornillos nivelantes una regla graduada situada a una distancia D conocida, obteniendo una lectura m_1 . Al mover uno de los tornillos la burbuja se desplaza n divisiones, lectura m_2 .

El ángulo girado será:

$$\alpha = \frac{m_1 - m_2}{D}$$

La sensibilidad del nivel se obtendrá dividiendo el ángulo entre el número de divisiones:

$$S = \frac{\alpha}{n}$$

- Aumento del anteojo

Las dos lentes convergentes del anteojo constituyen un sistema dióptrico centrado. El aumento es la relación que existe entre los ángulos bajo los que se ve la imagen de un objeto a través del anteojo y directamente. Únicamente depende de su configuración óptica.

- Apreciación

La apreciación es la capacidad del conjunto limbo-microscopio para identificar completamente una lectura. El valor de cada ángulo depende de la constitución del microscopio de lectura, siendo valores muy diversos. [1]

2.2.3. La brújula

Se trata de un instrumento de mano que se utiliza fundamentalmente en la determinación del norte magnético, ángulos horizontales y direcciones. Consta de una aguja magnética [A] que gira sobre un pivote agudo de acero duro [B] en un soporte cónico en el centro de la aguja magnética. Ésta se ubica dentro de una caja [C] que contiene un círculo graduado [D] dividido en cuadrantes de 0° a 90° generalmente, marcando Norte, Sur, Este y Oeste.

La aguja contiene un contrapeso de bronce [E] para contrarrestar los efectos de la inclinación magnética, ubicándose dependiendo de la latitud del lugar.

Cuando la brújula no esté siendo utilizada, un dispositivo elevador [F], separa la aguja del pivote sobre el que gira. En su interior existe un nivel esférico de burbuja [G].

La parte exterior de la brújula es un vidrio protector [H] que protege la aguja, el círculo y el nivel esférico.

La plomada [I] se utiliza para hacer coincidir el eje de giro de la aguja con la vertical del lugar del punto que se quiere medir. En otros casos, puede que no tengan plomada incorporada y se apoyen sobre un bastón de madera.

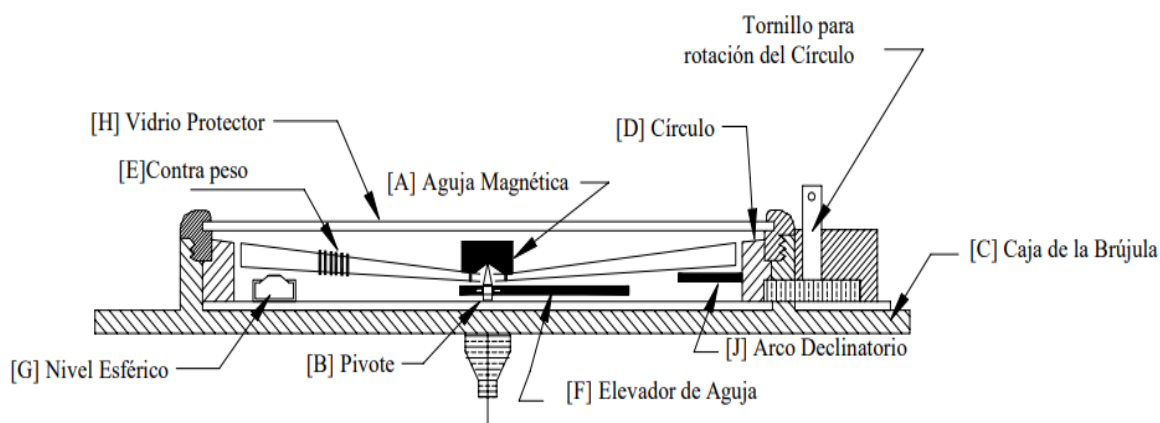


Figura Número 2.5.-Partes principales de una brújula / Fuente [6]

Para corregir la declinación magnética, muchas brújulas contienen un arco de declinación [J] graduado en grados, cuyo cero está alineado al norte, de esta forma y conociendo la

declinación del lugar, se puede hacer girar el círculo horizontal hasta que coincidan la lectura con el valor de la declinación del lugar, de forma que el rumbo medido con la brújula es el rumbo real.[6]

2.2.3.1. Tipos de brújulas

Existen los siguientes tipos de brújulas:

- Brújulas de limbo móvil: El limbo acimutal gira con el anteojo, siendo la aguja la que está imantada, sirviendo como índice para conseguir el valor del ángulo.
- Brújulas de limbo fijo: La aguja gira con el anteojo, estando el limbo fijo y unido a un imán y, por lo tanto, se orienta de forma automática.



Figura Número 2.6.-Brújula / Fuente (brújulas.online)

Los rumbos son ángulos horizontales respecto del norte magnético de la visual trazada mediante un anteojo. Para poder evaluar de igual manera ángulos verticales, se puede incorporar un limbo vertical al anteojo.

2.2.3.2. Aplicaciones topográficas

La brújula se utiliza en topografía para evaluar los diferentes ángulos, siendo las determinaciones más importantes las siguientes:

- Determinación de ángulos: La brújula se utiliza como goniómetro para evaluar ángulos acimutales. Si se considera una brújula de limbo fijo, el ángulo existente entre dos visuales se obtiene por diferencia de sus rumbos.
- Determinación de la meridiana magnética: Haciendo estación con la brújula en el punto considerado queda materializada la dirección de la meridiana, que puede ser referencia respecto a un punto cualquiera.
- Determinación de la meridiana astronómica: Para determinar la dirección del norte geográfico es necesario hallar la declinación magnética del lugar y establecer la relación:

$$\text{acimut} = \text{rumbo} \pm \text{declinación}$$

2.2.4. Teodolito electrónico

2.2.4.1. Medición electrónica de ángulos

El teodolito no ha tenido cambios en su diseño, pero sí ha habido avances en los materiales, la óptica y el sistema de ofrecer la lectura angular.

En la década de los 80, se produjo un gran cambio con la implantación de sistemas de lectura de círculo electrónico y de sensores para detectar la inclinación de la vertical del instrumento y su conexión con la distanciometría electrónica.

Hacia 1977, en Estocolmo, se presentaron los primeros teodolitos electrónicos. A partir de ese momento, las investigaciones se orientaron hacia la implantación de sistemas de lectura de círculo electrónico, pero fue a partir de los años ochenta cuando sus precios los hicieron competitivos.

La medición angular, tanto acimutal como cenital, se establece a partir de captaciones dinámicas con exploración óptico-electrónica o por métodos basados en un sistema de evaluación incremental por vía óptica. Así, se determinan los valores angulares entre dos posiciones fijas (una inicial y otra final) con una precisión similar a la de los teodolitos ópticos.

2.2.4.2. Sistemas de evaluación de ángulos

Para establecer la medida electrónica de un ángulo mediante un teodolito existen las siguientes formas:

- Sistemas basados en la conversión analógico-digital

Se basa en convertir una determinada lectura al código binario mediante un codificador. El círculo correctamente codificado es leído por fotosensores, otorgando posiciones de luz y oscuridad en paralelismo con los valores angulares. De esta manera se puede obtener una lectura angular por cada visual, determinando el ángulo por diferencia de lecturas.

- Sistemas basados en codificadores ópticos

El codificador giratorio incremental óptico está formado por una escala principal y una escala secundaria, junto con una sección sensora. La variación de luz y sombra que se genera cuando la escala principal gira un paso se transforma en señal sinusoidal susceptible de ser cuantificada y codificada.

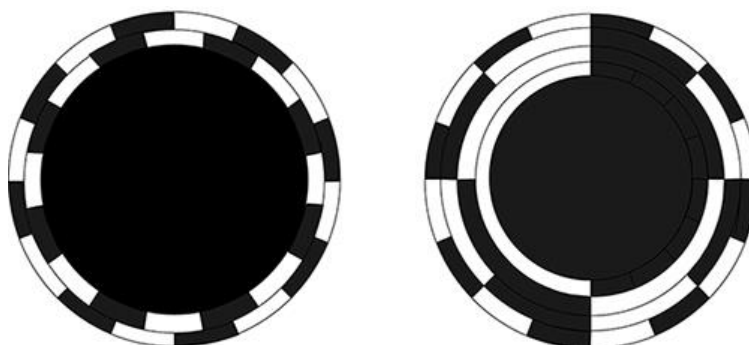


Figura Número 2.7.-Codificadores rotatorios incremental y absoluto / Fuente (digikey.com)

- Sistemas basados en la captación dinámica del ángulo

En todas las medidas se auscultan todos los trazos del círculo y se eliminan errores. Con el establecimiento de un origen se puede determinar el número de divisiones que mediante un comparador se determina el desfase de la medición.

El círculo rota mediante un motor a través de dos parejas de fotodiodos diametralmente opuestos, uno de ellos fijo LF, marcando el origen de la medición angular. El otro, es móvil LM, es el encargado de recorrer todas las posibles posiciones del círculo de forma solidaria con el anteojo. Para determinación del ángulo entre diodos Φ , se mide la diferencia de fase entre las señales recibidas de LF y LH. Cuando se encuentran en concordancia de fase, el ángulo se determinará por el número fases. Cuando las señales LH y LF se encuentran desplazadas, la relación se obtiene mediante la siguiente fórmula[7]:

$$\varphi = n\Phi_0 + \Delta\Phi$$

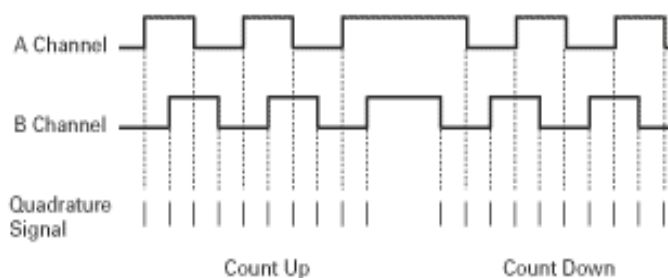
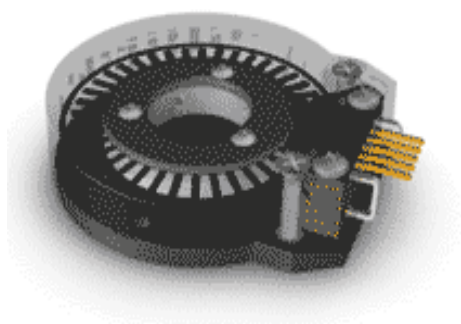


Figura Número 2.8.-Sistema dinámico

2.3. MEDIDAS DISTANCIOMÉTRICAS

En la medida de distancias existen dos métodos bien diferenciados; la medición de forma directa, la cual compara la longitud a medir con otra que se toma como unidad. O la medición indirecta donde el instrumento mide directamente la magnitud desconocida.

Generalmente en los trabajos topográficos se utiliza la medición indirecta de distancias ya que necesita gran precisión en la medida.

2.3.1. Medida directa de distancias

2.3.1.1. Cintas métricas y reglas

Las cintas y los rodetes pueden ser de tela, fibra o plástico, con el fin de evaluar distancias de forma rápida y poco precisa. Su campo de aplicación es selectivo ya que estos instrumentos debido a sus materiales pueden sufrir deformaciones o deteriorarse dificultando aún más la precisión.



Figura Número 2.9.-Cinta de fibra / Fuente (bticdiy.com)

Las cintas metálicas tienen más precisión ya que están formadas por una lámina de metal de dimensiones variables y de 25 ó 50 metros de longitud, permitiendo un error relativo que puede aproximarse al valor 1/2000.



Figura Número 2.10.-Cinta topográfica metálica / Fuente (bricodiy.com)

Los parámetros de la cinta metálica son los siguientes:

- Longitud de la cinta: l
- Peso por unidad lineal: P
- Coeficiente de dilatación: α
- Módulo de elasticidad: E

2.3.1.2. Reglas o reglones

El equipo se compone por al menos, dos reglas colocadas a nivel sobre unos soportes adecuados. El espacio entre reglas se evalúa obteniendo un error relativo aproximadamente de 1/10000.

Las primeras reglas eran de madera aunque después se empezaron a utilizar las reglas metálicas o bimetálicas. El principal inconveniente de éstas era su difícil manejo por el excesivo peso que suponían así como su limitación en la longitud.

2.3.1.3. Hilos ínvar

El ínvar es una aleación (64% Fe, 36% N) maleable y dúctil, y densidad de 8 gr/cm³.

Este equipo es manejado un operador en cada extremo, haciendo coincidir la vertical del extremo con el inicio de la medición y marcando el extremo del hilo. Las longitudes utilizadas en Europa son de 24m mientras que en EEUU se utilizan hilos de 50m. El hilo se coloca en un trípode con una polea que lo estira mediante un peso de 10Kg o un

microscopio que permite leer las distancias. Este equipo tiene un error relativo de $1/25000 \div 1/50.000$. [1]

Para una correcta medición se deben tener en cuenta errores circunstanciales así como la corrección de determinados efectos provocados por el propio instrumental:

- Corrección por alineación.
- Corrección por inclinación.
- Corrección por elasticidad.
- Corrección por dilatación.
- Corrección por catenaria.

2.3.2. Medida indirecta de distancias por métodos estadimétricos

Los métodos estadimétricos se fundamentan en que existe una proporción entre la longitud visualizada en los trazos del anteojo, con su correspondiente referencia exterior.

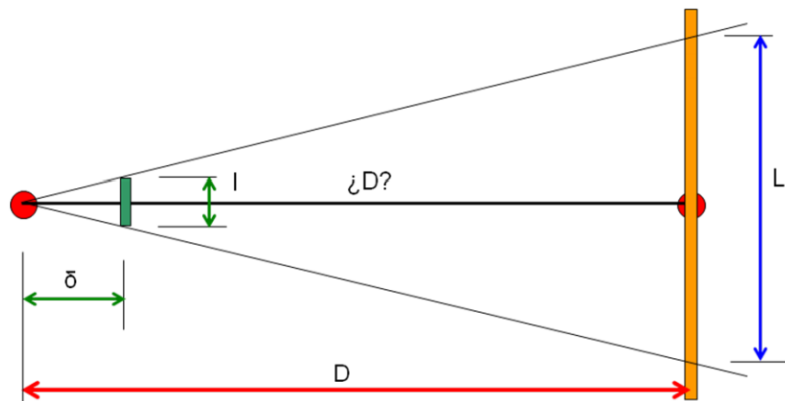


Figura Número 2.11.-Fundamento de medida estadimétrica de distancias / Fuente (ocw.unican.es)

De la figura anterior se obtiene la fórmula fundamental de la medición estadimétrica de distancias:

$$\frac{\delta}{l} = \frac{D}{L} \rightarrow D = \frac{\delta}{l} L$$

Existen diferentes tipos de estadímetros dependiendo de las constantes o variables que intervengan, dividiéndose en diferentes categorías:

- Estadímetro de primera categoría

Las variables δ y l se mantienen constantes, de modo que la relación fundamental es la siguiente:

$$D = \frac{\delta}{l} L = K L$$

Siendo D proporcional a la longitud medida por la estadia. K es la constante estadimétrica o distanciométrica, cuyo valor suele ser 100 o con una menor frecuencia 50, 200 ó 250.

- Estadímetro de segunda categoría

Las variables δ y l se mantienen constantes, de modo que la relación fundamental es la siguiente:

$$D = \frac{\delta L}{l} = \frac{K1}{l}$$

A este tipo corresponden las estadías de horizontales, de longitud fija, habiendo sido muy poco utilizadas.

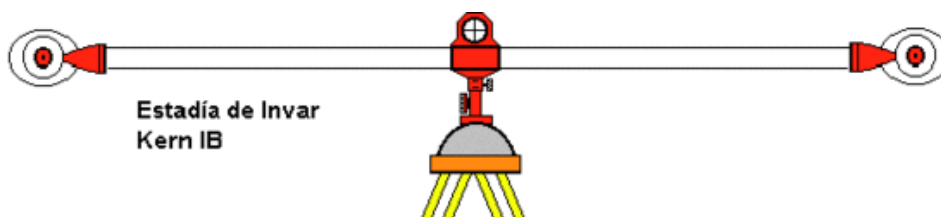


Figura Número 2.12.-Estadía horizontal invar / Fuente (ocw.unican.es)

- Estadímetro de tercera categoría

Las variables L y l se mantienen constantes, de modo que la relación fundamental es la siguiente:

$$D = \frac{L}{l} \delta = K2 \delta$$

Siendo la distancia directamente proporcional δ .

Centrándose en los taquímetros de primera categoría, uno de los aspectos diferenciadores de este tipo de aparatos es el anteojo, el cual puede utilizarse como estadímetro si el retículo lleva impreso los trazos estadimétricos, simétricamente situados del punto de intersección de los hilos que configuran la cruz.

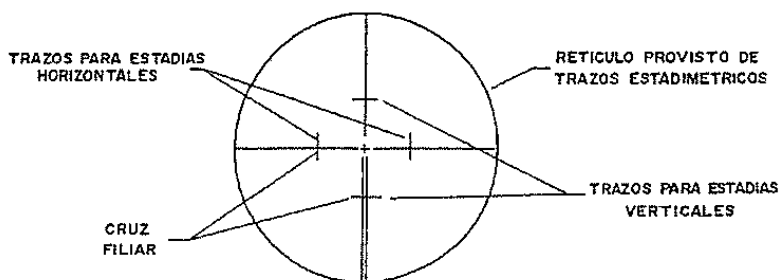


Figura Número 2.13.- Trazos del anteojo / Fuente (ocw.unican.es)

A demás de ello el taquímetro necesita una estadía para medir la distancia. La estadía vertical, comúnmente llamada mira, permite establecer la relación fundamental de la distanciometría óptica.

Como se ha comentado anteriormente, en el retículo existen dos hilos grabados simétricos respecto a la horizontal central a una distancia δ conocida, con separación l entre ellos. Observando la estadía vertical a una distancia D , los hilos estadimétricos quedan proyectados sobre la estadía, obteniéndose una magnitud L , que resulta de la diferencia de lecturas de ambos hilos sobre ella. Obteniéndose la distancia por semejanza de triángulos según la siguiente relación:

$$\frac{\delta}{l} = \frac{D}{L} \rightarrow D = \frac{\delta}{l} L$$

Esta relación es el caso ideal de la perpendicularidad entre el eje del aparato y la estadia vertical. Para mantener la correspondencia en cualquier caso sería preciso obligar a la perpendicularidad entre la visual desde el aparato y la estadia vertical. Puesto que este supuesto es difícil de lograr en campo, es preferible colocar la estadia en posición vertical coincidiendo con la vertical del lugar, y, estableciendo posteriormente una serie de correcciones.[8]

Las correcciones se pueden concretar en las siguientes expresiones:

- Lectura en la estadia vertical: L
- Distancia geométrica: K L sen V
- Distancia reducida: K L sen V

2.3.3. Medida indirecta de distancias por métodos electromagnéticos

En 1849, Fizeau, estableció un sistema para determinar la velocidad de la luz, conociendo la distancia. Esto determinaría el origen de la medida indirecta de distancias por métodos electromagnéticos. Cien años más tarde el geodesta Bergstrand, se basó en el experimento de Fizeau para crear aparato utilizando medios electrónicos para la determinación de la velocidad de la luz el cual se utilizó para determinar distancias conociendo la velocidad de la luz.

De esta forma surge la medición electrónica de distancias, consistiendo en la emisión de una onda electromagnética, su reflexión en un prisma y su posterior recepción y análisis.

Existen dos formas para evaluar la distancia:

- Mediante la medida del tiempo transcurrido en la medición (pulsación), donde se obtiene la distancia a partir de la velocidad de la luz y del tiempo consumido por ésta en alcanzar y volver al instrumento emisor.

$$D = \frac{c}{2 t}$$

- Mediante el método de comparación de fase. Al emitir una onda de frecuencia conocida, es recibida y devuelta por un receptor (prisma), pudiéndose determinar la distancia.

Los aparatos que evalúan distancias por métodos electromagnéticos se clasifican según el tipo de onda portadora:

- Electromagnéticos: Utilizan como portadora microondas de longitud de onda de 1 m. a 1 cm. Telurómetros.
- Electroópticos: Utilizan como portadora ondas luminosas del tipo luz visible (0,4 μ m – 1,2 μ m). Distanciómetros y geodímetros.
- Los distanciómetros emplean ondas infrarrojas generadas por LED, que emiten a temperatura ambiente.

A continuación se describen brevemente los instrumentos mencionados anteriormente.

- El telurómetro

Está compuesto por el máster y el remote. El máster es el emisor de ondas de alta frecuencia, que son moduladas por otras de baja frecuencia. La onda portadora lleva la frecuencia patrón hasta el remote, desde el cual es devuelta como una nueva onda portadora, comparándose en el máster las fases de salida y llegada. Estos aparatos permiten utilizar interoperadores, se puede operar de día o de noche y aunque las precisiones son menores, se pueden utilizar en condiciones atmosféricas adversas. Para su uso son necesarios dos operarios, alcanzando hasta 150Km con precisiones de 10mm+3ppm.



Figura Número 2.14.-Telurómetro / Fuente (picclick.com)

- El geodímetro

Es un instrumento que emite luz hacia el lugar de puntería (prisma), el cual refleja la luz y es recogida por el geodímetro, pudiéndose calcular la distancia, conociendo la longitud de onda y midiendo el desfase entre ondas de salida y llegada. En distancias cortas (4 ó 5 km.) se emplea luz de lámpara de tungsteno, mercurio o tubos de xenón (en el visible), o bien diodos de arseniuro de galio en el infrarrojo. Para distancias largas (hasta 60 km.) se utilizan láseres de helioneón.

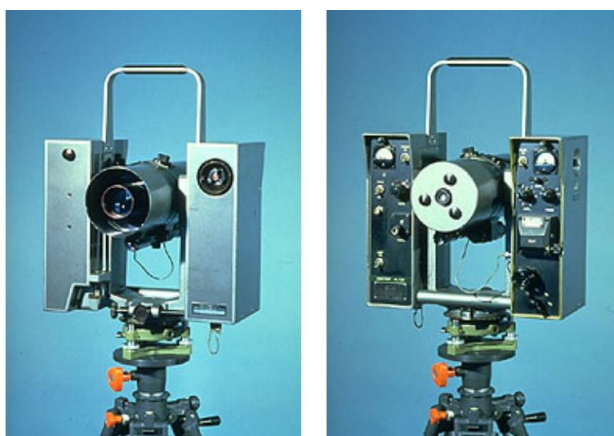


Figura Número 2.15.-Geodímetro / Fuente (pinterest.es)

- Los distanciómetros

El descubrimiento de los LED de arseniuro de galio, de los semiconductores y el del cristal AsGa, permitieron gracias a la emisión de luz en el infrarrojo, la aplicación de las radiaciones infrarrojas a la medición de las distancias.

Actualmente gran parte de los instrumentos distanciométricos son de este tipo.

La onda es emitida a temperatura ambiente, con longitudes de onda entre 0,9 y 0,92 micras.

Los distanciómetros son los instrumentos más baratos y fáciles de usar de los descritos anteriormente, existiendo los de alcance de 5Km con errores de 3mm+3ppm y que necesitan un prisma para su medición; O los de alcances comprendidos entre 500 y 1000m, los cuales utilizan emisores laser prescindiendo del prisma receptor.

2.4. ESTACIÓN TOPOGRÁFICA

La estación total (ETT) es un instrumento que ha causado una gran revolución en los trabajos topográficos y geodésicos. Se trata de un instrumento que mide ángulos y distancias por medios electrónicos y realiza tareas computacionales utilizando un microprocesador integrado. La ETT es capaz de almacenar datos en su memoria interna o en un registrador exterior. Estos datos no solo se tratan de lecturas de distancias o ángulos, también es capaz de almacenar códigos o anotaciones de cualquier tipo y condición.

2.4.1. Aspectos previos

Se denomina medición total a la acción de una vez hecha la puntería, obtener los tres valores de un punto en el espacio (ángulo vertical, ángulo horizontal y distancia geométrica).

Una vez se conozcan los tres valores, la distancia reducida y el desnivel se calculan de forma inmediata, siendo proporcionados por el equipo.

Para lograr evaluar los ángulos vertical y horizontal y la distancia, el avance de esta técnica ha pasado por las siguientes fases:

1. Fase del equipo excéntrico

Una vez se consigue evaluar las distancias por métodos electromagnéticos, se colocan el teodolito y el instrumento que mide la distancia constituyendo un sistema excéntrico, que, a partir de los datos tomados en campo, hacia posible la obtención del resultado deseado. En este caso, era por tanto necesario la realización de dos punterías bien diferenciadas.

2. Fase del equipo tándem vertical

Los distanciómetros eran colocados sobre los teodolitos o incluso taquímetros, formando así un sistema más cómodo que el caso anterior pero aun así teniendo que realizar una puntería doble; puntería para captar los ángulos y puntería para determinar las distancias, ya que el distanciómetro se encontraba por encima del anteojo.

También era necesaria la medición del ángulo cenital, para el cálculo de la distancia reducida.

3. Equipo unitario

En este caso es un elemento único, contiene los elementos precisos para evaluar

ángulos distancia en una puntería única. En un primer momento el teodolito era óptico denominándose al conjunto semiestación total. Para ser una estación total, tiene que ser un teodolito electrónico de forma que los ángulos horizontal y vertical son evaluados por métodos electromagnéticos.

2.4.2. Partes principales de una ETT

Las partes de una ETT son prácticamente las mismas que las de un teodolito, diferenciándose únicamente en pequeños detalles en función del modelo de instrumento.



Figura Número 2.16.-Partes principales de una ETT

A partir de las observaciones realizadas con una estación topográfica, queda referenciado el punto visado P en función de las coordenadas del punto estación E (X_E , Y_E , Z_E) y los datos captados por la estación.

Datos captados por la estación total:

- Ángulo horizontal respecto al eje Y, θ_A^B o lectura respecto de un origen arbitrario L_A^B .
- Ángulo cenital V_A^B .

- Distancia geométrica D_g .
- Datos adicionales:
- Altura del aparato i_A
- Altura del prisma m_B

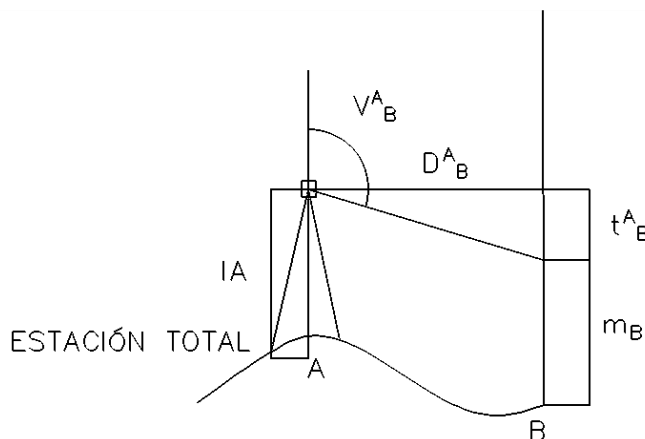


Figura Número 2.17.-Medición con ETT en alzado

Para establecer las coordenadas del punto B se llevan a cabo las siguientes operaciones:

$$D_A^B = D_g \sin V_A^B$$

$$X_B = X_A + D_A^B \cos V_A^B$$

$$Y_B = Y_A + D_A^B \sin V_A^B$$

$$Z_B = Z_A + t_B^A + i_A - m_B$$

$$t_A^B = D_A^B \cot V_A^B$$

2.4.3. Las estaciones topográficas en la actualidad

El avance de las estaciones topográficas es constante, entre las mejoras que repercuten de una forma directa en la determinación de ángulos y distancias se pueden clasificar las siguientes:

- Plomada láser

Son utilizadas en la actualidad al ser la forma más moderna de hacer coincidir el eje principal del instrumento con el punto estación. Un punto luminoso hace corresponder el centro del aparato con el punto estación a través de la vertical del lugar, asegurando 1mm en el estacionamiento.

- Nivel electrónico

Hace coincidir la vertical del lugar con la vertical del aparato. Contribuye a minimizar el error de dirección en la distancia, y también el angular (acimutal y cenital). Esto se debe a que la sensibilidad del nivel queda reducido hasta 6cc.

- Precisión y alcance en la determinación de la distancia

Existen equipos con apreciaciones por debajo del segundo centesimal siendo excelentes para la realización de trabajos geodésicos. Además tienen cobertura

suficiente en cuanto a posición y alcance, utilizando reflectores de un solo prisma o más

- Teclados de estructura lógica y gestión de datos

Estos instrumentos tienen teclados estructurados de una forma lógica y su manejo resulta muy sencillo.

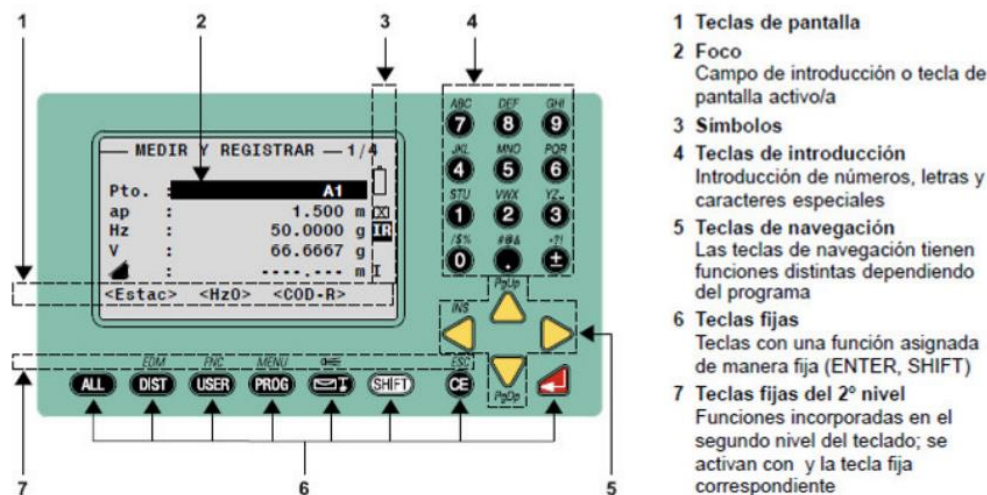


Figura Número 2.18.-Teclado de una ETT / Fuente (ocw.unican.es)

Con los menús incluidos en los instrumentos se puede lograr entrada de datos para su gestión y buscar códigos y atributos de forma rápida, disponiendo de los elementos necesarios para lograr el múltiple objetivo:

- Teclas que permiten medir los ángulos y la distancia y grabar los datos obtenidos.
- Memoria interna para 3000 series de datos ó 4000 puntos con coordenadas.
- Posibilidad de consultar la hora y la fecha en cualquier momento. Grabación de éstas con cada serie de datos.
- Puerto apropiado para conexión a ordenador y terminal de datos.

Los datos captados quedan registrados en tarjetas ligeras, de pequeño formato, flexibles y fiables, dotadas de una alta capacidad de memoria. [1]

3. MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

3.1. CONCEPTO DE MODELO

La palabra modelo se puede definir como una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades.

De esta definición se puede deducir que la realidad representada a través del modelo únicamente puede reproducir algunas propiedades del objeto o sistema original que, por lo tanto, se ve representado por otro objeto de menor complejidad.

3.2. TIPOLOGÍA DE MODELOS

Los modelos se construyen manteniendo una relación de correspondencia con la realidad cuyas variantes pueden producir modelos de características notablemente diferentes. Existen tres tipos de modelos:

- Modelos icónicos, la relación de correspondencia se establece a través de las propiedades morfológicas; una maqueta es un modelo del objeto representado donde la relación establecida es fundamentalmente una reducción de escala.
- Modelos análogos, poseen algunas propiedades similares a los objetos representados pero sin ser una réplica morfológica de los mismos; un mapa es un modelo de la realidad establecido mediante un conjunto de convenciones relativamente complejo que conduce a un resultado final claramente distinto del objeto representado.
- Modelos simbólicos, se llega a un nivel superior de abstracción ya que el objeto real queda representado mediante una simbolización matemática (geométrica, estadística, etc.).

3.3. DEFINICIÓN MODELO DIGITAL DEL TERRENO

Los modelos digitales del terreno (MDT) son un tipo de modelos simbólicos, definiéndose inicialmente como “el conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio”

Condicionantes de los MDT:

- Se caracterizan por ser digitales y no analógicos.
- Requieren codificación de la información para su posterior representación
- Debe de existir una estructura interna que represente las relaciones espaciales entre los datos
- La variable a representar debe de ser cuantitativa y de distribución continua

A partir de los condicionantes anteriores se llega a una definición más completa y precisa de MDT quedando como definición final la siguiente:

“Estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua”

3.4. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

Se define modelo digital de elevaciones (MDE) a la estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. [1]

De forma genérica puede describirse según la siguiente ecuación:

$$z = f(x, y)$$

Donde z es la altitud del punto situado en las coordenadas x e y , y z la función que relaciona la variable con su localización geográfica. Los valores de x e y suelen corresponder con las abscisas y ordenadas de un sistema de coordenadas plano, habitualmente un sistema de proyección cartográfica. La anterior ecuación representa una superficie donde la altitud es una variable continua.

Comúnmente a los modelos digitales de elevaciones también se les denomina MDT

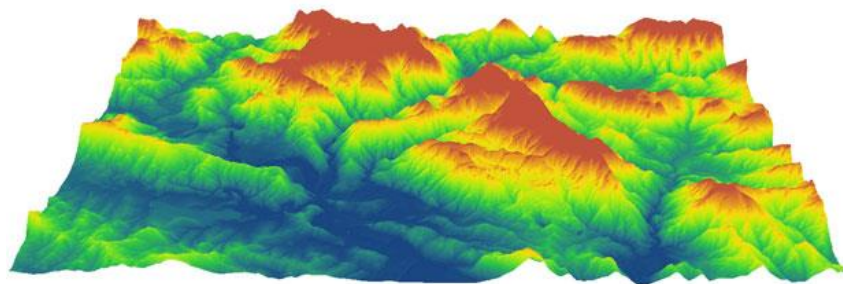


Figura Número 2.19.-Modelo Digital del Terreno (MDT) / Fuente (gisandbeers.com)

3.5. ORIGEN DE LOS MDT

El termino MDT “Digital Terrain Model” se originó en los años 50, en el Laboratorio de Fotogrametría del Instituto de Tecnología de Massachusetts. En 1958 Miller y Laflamme establecen los primeros usos de los MDT para el tratamiento de problemas tecnológicos, científicos y militares.

En 1967, el Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis presentó el Synagraphic Mapping Technique (SYMAP). El SYMAP es un conjunto de programas de manejo de cartografía digital, el cual incorpora algunos algoritmos de interpolación permitiendo generar mapas de isolíneas a partir de puntos de altitud.

El SYMAP fue uno de los primeros programas de manejo de la información espacial mediante metodología informática.

Posteriormente surgieron otros como SYMVU, esta herramienta permite simulaciones 3D de los datos procedentes de programas como SYMAP, o GRID, que manejaba información en formato matricial y, en general, un número considerable de aplicaciones con bases muy diferentes.

Fue en EE.UU en los años 80, cuando los trabajos del Geological Survey, estandarizan la información de un modelo digital de elevaciones para los Estados Unidos, USGS-DEM, en formato matricial.

Los programas de modelos digitales están actualmente en desarrollo, tratando de mejorar problemas básicos, como por ejemplo estructurar bien los datos, la compatibilización de diferentes estructuras entre sí, la búsqueda de algoritmos eficientes para generar nueva información y el intercambio de ésta entre sistemas diferentes.[1]

3.6. MODELOS DIGITALES Y MODELOS ANALÓGICOS

Los MDTs tienen una versión analógica en mapas (MAT) que representa las mismas características del terreno, pero codificándolas sobre un soporte físico mediante convenciones gráficas, actualmente ambos se complementan, la ventaja que ofrece la codificación numérica es clara, pero los mapas impresos son imprescindibles para el manejo práctico de la información. En la tabla que se muestra a continuación se pueden observar las principales diferencias entre ambos.

PROPIEDAD	MAT	MDT
MANEJO	SENCILLO	COMPLEJO
ESTABILIDAD	BAJA	ALTA
TRANSPORTABILIDAD	ALTA	BAJA
ACTUALIZACIÓN	COMPLEJA	SENCILLA
TRATAMIENTO NUMÉRICO	DIFÍCIL	FÁCIL
SIMULACIÓN	NO	SI

Tabla Número 2.1.-Comparación propiedades MDT Y MAT

3.7. TIPOS DE MDT

Las estructuras que han sido utilizadas para los MDT se clasifican en función de su forma de representar los datos, existiendo dos modelos, el vectorial y el ráster o teselar.

Las diferentes variantes dentro de estos modelos, se muestran en la siguiente tabla.

VECTORIALES	CONTORNOS	<u>SECUENCIAL</u> : las líneas se almacenan como cadenas de cotas. <u>ANALÍTICA</u> : las líneas se almacenan como segmentos de Bézier, polinómicos, etc.
	PERFILES	Cadenas paralelas de cotas en línea con altitud variable.
	TRIÁNGULOS	Red de triángulos irregulares (<i>TIN</i>).
RASTER	MATRICES	<u>REGULARES</u> : cotas sobre una malla cuadrada de filas y columnas equidistantes. <u>ESCALABLES</u> : cotas sobre submatrices jerárquicas y de resolución variable.
	POLÍGONOS	Cotas asignadas a teselas poligonales regulares (triángulos o hexágonos).

Tabla Número 2.2.-Estructuras más utilizadas para el almacenamiento de los MDT

3.7.1. Modelos vectoriales

Son modelos en los que se representa el territorio mediante el uso de puntos de coordenadas relativas a un sistema referencial predeterminado. A partir de las coordenadas espaciales se gestionan los puntos, con dos puntos se gestionan las líneas y con las líneas se forman los polígonos.

3.7.1.1. Modelo de contornos

En el modelo de contornos la estructura básica es un vector, compuesto por un conjunto de pares de coordenadas (X, Y) que describe la trayectoria de líneas isométricas, es decir, curvas de nivel o isohipsas.

3.7.1.2. Red de triángulos irregulares

Es una de las estructuras más utilizadas para la representación de modelos vectoriales, están compuestas por una red de triángulos irregulares (TIN), Triangulated Irregular Network. Los triángulos quedan definidos a partir de tres puntos cercanos no colineales, formando un plano. De este modo, el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a una estructura anterior de puntos, constituyendo cada uno de los triángulos las denominadas caras del modelo digital del terreno. [1]

3.7.1.3. Almacenamiento de datos vectoriales

El almacenamiento de datos vectoriales permite establecer relaciones topológicas.

Las ventajas de la topología son las siguientes.

- Asegurar que una posición existe únicamente un elemento.
- Las líneas se cruzan en los nodos.
- Los polígonos rellenan el espacio, exhaustivamente.
- Los límites comunes se almacenan una sola vez.
- Permite establecer relaciones topográficas

A continuación se explica el almacenamiento de los datos vectoriales para facilitar la comprensión del método de almacenamiento. El modelo representado no corresponde a las alturas para almacenar un MDE, sino a la morfología de los objetos del terreno. Se nombran los polígonos con letras y los arcos mediante números.

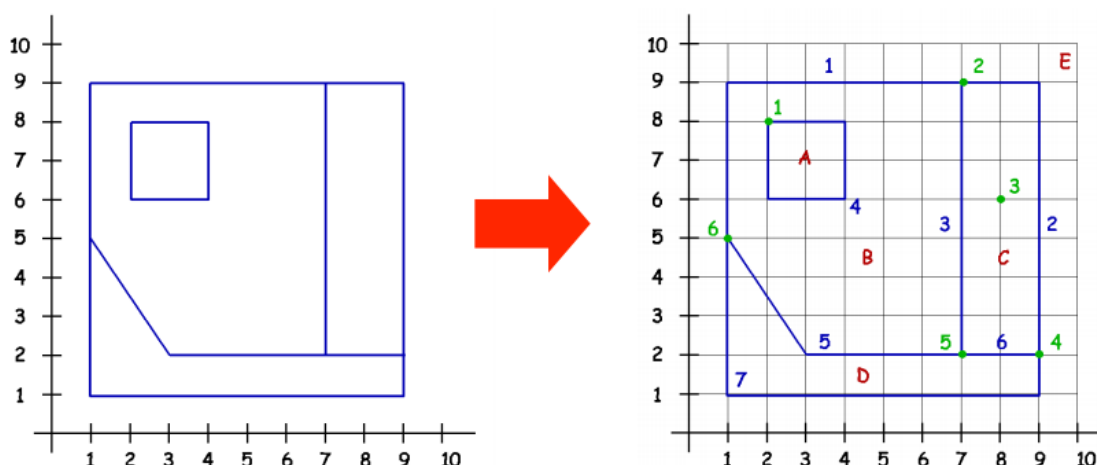


Figura Número 2.20.-Definición arcos, nodos y polígonos. / Fuente (ocw.unican.es)

El almacenamiento de datos se realiza por varios métodos:

- a. Topología de polígonos: Se anotan los polígonos con una letra y el número correspondiente a los arcos que lo forman.

TOPOLOGÍA DE POLÍGONOS	
POLÍGONOS	ARCOS
A	4
B	1,3,5,-4
C	2,3,6
D	5,6,7
E	Exterior

Tabla Número 2.3.-Topología de polígonos

- b. Topología de nodos: Se recorren todos los nodos de los objetos representados y se anota el número que corresponde a los arcos que se unen en él.

TOPOLOGÍA DE NODOS	
NODOS	ARCOS
1	4
2	1,2,3
3	2
4	2,6,7
5	3,5,6
6	1,5,7
NODO	CARA
3	C

Tabla Número 2.4.-Topología de nodos

- c. Topología de arcos: Se enumeran los arcos y se anota de izquierda a derecha el nodo origen el nodo final y el polígono que queda a su derecha e izquierda teniendo en cuenta que la dirección en la que se recorre el nodo es en sentido de las agujas del reloj.

TOPOLOGÍA DE ARCOS				
ARCO	NODO ORIGEN	NODO FINAL	POLÍGONO IZQUIERDA	POLÍGONO DERECHA
1	6	2	E	B
2	2	4	E	C
3	2	5	C	B
4	1	1	B	A
5	5	6	D	B
6	4	5	D	C
7	4	6	E	D

Tabla Número 2.5.-Topología de arcos

- d. Coordenadas de los arcos: Se anotan los arcos y las coordenadas de los nodos origen, final e intermedios.

COORDENADAS DE LOS ARCOS			
ARCO	NODO ORIGEN	NODOS INTERMEDIOS	NODO FINAL
1	1,5	1,9	7,9
2	7,9	9,9	9,2
3	7,9	--	7,2
4	2,8	(4,8)(4,6)(2,6)	2,8
5	7,2	3,2	1,5
6	9,2	--	7,2
7	9,2	(9,1)(1,1)	1,5

Tabla Número 2.6.-Coordenadas de los arcos

3.7.2. Modelos ráster o teselar

Representa el espacio mediante una serie de elementos discretos mediante una retícula, cada una de las celdas es indivisible y se identifica mediante su número de fila y columna. La información de cada celda es única y se asigna respecto un valor relativo a la variable representada.[9]



Figura Número 2.21.-Modelo Ráster

3.7.2.1. Matrices regulares

Resultan de superponer una retícula sobre el terreno, extrayendo la altura media de cada celda, entendiendo como tal el elemento de menor superficie que forma la retícula.

Se suele utilizar un valor asociado a cada nudo de la retícula o al punto medio de la celda.

La retícula adopta distintas formas, aunque se suele utilizar una malla regular cuadrada con filas y columnas espaciadas de igual forma, obteniéndose una resolución constante en el modelo.[9]

3.7.2.2. Matrices de resolución variable

Resuelven el principal problema de las matrices regulares, su resolución espacial prefijada, manteniendo, la sencillez conceptual y operacional. Los elementos pueden ser datos elementales, o bien submatrices con un nivel de resolución diferente. La estructura final es un árbol jerárquico de submatrices, cuya resolución se duplica cada nivel. [9]

3.7.2.3. Almacenamiento de datos ráster

Para el almacenamiento de datos se debe tener en cuenta el formato de almacenamiento y el sentido en el que se recorre la matriz. Existen diferentes estructuras de almacenamiento:

- Estructuras de almacenamiento simple

- Enumeración exhaustiva

Esta estructura almacena uno por uno los valores de cada celda, según una secuencia establecida, siendo la más habitual fila a fila partiendo de la celda superior izquierda.

1, 1, 2, 2, 2, 4, 4, 3, 1, 2, 2, 2, 2, 4, 4, 3, 1, 2, 2,
2, 4, 4, 3, 3, 2, 2, 2, 4, 4, 3, 3, 3, 2, 2, 4, 4, 4, 3,
3, 3, 2, 4, 4, 4, 3, 3, 3, 1, 4, 4, 3, 3, 3, 3, 1, 1, 4,
3, 3, 3, 3, 1, 1, 1

1	1	2	2	2	4	4	3
1	2	2	2	2	4	4	3
1	2	2	2	4	4	3	3
2	2	2	4	4	3	3	3
2	2	4	4	4	3	3	3
2	4	4	4	3	3	3	1
4	4	3	3	3	3	1	1
4	3	3	3	3	1	1	1

Figura Número 2.22.-Enumeración Exhaustiva / Fuente (ocw.unican.es)

- Run length encoding

En este tipo de estructura la codificación se hace agrupando grupos de valores seguidos, en lugar de valor a valor. Este procedimiento tiene dos modalidades:

-Estándar (Número y valor): Al recorrer la matriz de datos cuenta el número de datos con el mismo valor, poniendo primero el número de datos y después su valor. Es decir, si la secuencia es 112237777 el almacenamiento de datos será: 2,1 2,2 1,3 4,7

-Punto de valor (Valor, posición): En este caso, se indica primero el valor de los datos, y seguidamente, la posición que ocupa en el recorrido de la matriz. Por ejemplo la siguiente secuencia 112237777 se almacenaría de la siguiente forma: 1,2 2,4 3,5 7,9

A demás de estas modalidades tiene varias órdenes de almacenamiento, las cuales se pueden resumir en la siguiente imagen.

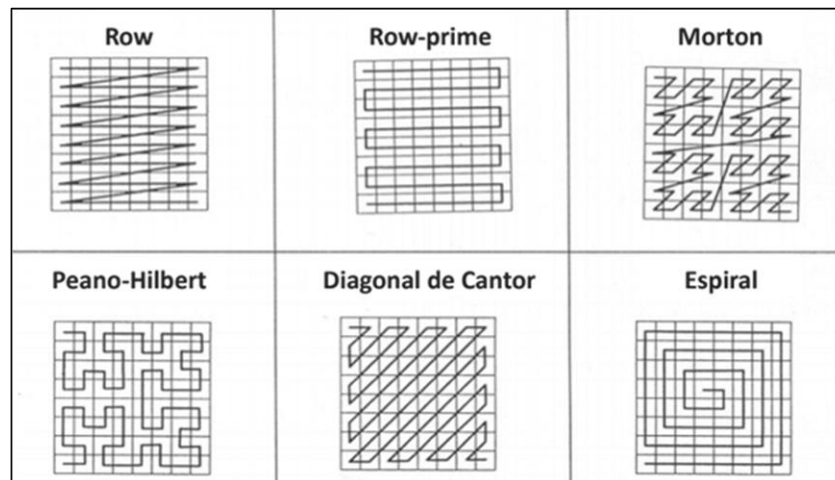


Figura Número 2.23.-Órdenes de almacenamiento simple / Fuente (ocw.unican.es)

▪ Estructuras quadtree

El procedimiento utilizado es el de punto valor, el sistema más difundido para identificar los cuadrantes de distinto rango jerárquico es el Número matricial de Morton.

Los cuatro primeros cuadrantes del mapa llevan los números 0,1,2 y 3. Sobre este primer dígito se van añadiendo nuevos a medida que los cuadrantes se subdividen en otros nuevos. El resultado de este almacenamiento se muestra en las siguientes figuras.

2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
1	1	1	2	2	2	3	3	1	1	1	2	3	2	3	3
3	1	1	1	2	3	3	3	3	1	1	1	3	3	3	3
3	1	1	1	2	3	3	3	3	3	1	1	3	3	3	3
3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3
3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3
3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3
3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3

Figura Número 2.24.-Secuencia estructura quadtree

222	223	232	233	32	332	333
220	221	230	231		330	331
202	203		302	303		
200	201	21	300	301		31
	2	3				
0	12	13				
	10	11				

Figura Número 2.25.-Numero matricial de Morton

4. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CON ETT

4.1. EMPLAZAMIENTO

El territorio objeto de contraste es una nave industrial situada en el polígono de Tanos-Viérnolles, concretamente la nave de Agro Cantabria.

El polígono industrial de Tanos-Viérnolles está emplazado en la zona de Torrelavega, junto a dos de las principales vías de comunicación del área de influencia de Torrelavega: la autovía A-67 y la Carretera Nacional 611.

La ubicación de la nave en cuestión se muestra en la siguiente figura:

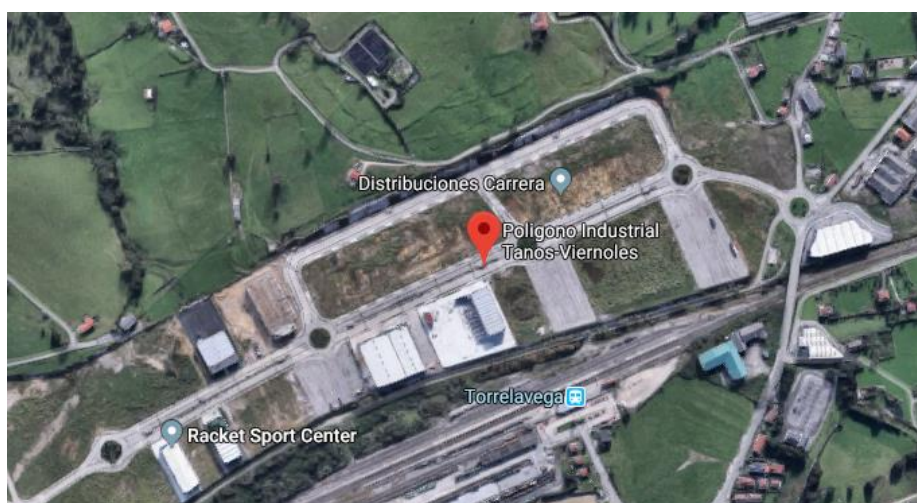


Figura Número 2.26.-Polígono de Tanos- Viérnolles, Torrelavega. / Fuente (googlemaps)

4.2. PLANIFICACIÓN

Para la realización de un levantamiento topográfico es necesario una planificación previa de la metodología de trabajo a realizar, con el objetivo de optimizar recursos y obtener los mejores resultados para conseguir el objetivo del mismo.

La planificación previa a la realización del trabajo es la siguiente:

- Reconocimiento de la zona
- Diseño de la red de bases
- Trabajos con estación total
- Implantación de una red de bases GPS

Una mala planificación puede conllevar a problemas como la prolongación del tiempo de realización de labores topográficas o incluso su repetición. Por esto mismo la planificación es un punto fundamental en cada levantamiento topográfico.

4.3. RECONOCIMIENTO DE LA ZONA

Lo primero que se llevó a cabo fue un reconocimiento de la zona en coche. Durante este proceso, se comprobó que la nave objeto de estudio tenía buen acceso y buena geometría para su posterior modelado. Seguidamente se realizó un reconocimiento a pie, en el cual

se realizaron fotografías de la zona para estudiar las posibles ubicaciones de las bases, además de las posibles afectaciones de terrenos colindantes, servicios, etc. Después de estas visitas se descartó la opción de realizar un levantamiento por GPS, debido a que las naves colindantes estaban muy próximas a la nave objeto de estudio.

En la parte frontal y trasera de la nave el cielo estaba más despejado, pero no lo suficiente para conseguir una buena cobertura de satélites y en consecuencia una buena precisión de las medidas.

4.4. DISEÑO DE LA RED

La red de bases es la línea fundamental del levantamiento y la forman un conjunto de estaciones desde las cuáles se toman todos los puntos para la realización del levantamiento.

Así las coordenadas de estas bases se han calculado con alta precisión. En la zona de estudio de y con spray en mano, se fueron marcando las tres bases principales de las que posteriormente se sacan las coordenadas mediante GPS.

4.4.1. Metodología empleada

En un principio se tenía la idea de realizar un único itinerario, pero la posibilidad de dividirlo en dos partes mejoraba la calidad de los cálculos y disminuía la posibilidad de cometer errores mayores, así que finalmente se optó por la realización de dos itinerarios. Así pues, este proyecto consta de 7 estaciones y 3 estaciones de referencia, repartidas en un par de poligonales abiertas:

- Poligonal 1: E03, R01, L1,L2, L3....B04, E04, R03,L1, L2, L3... B05, E05,R04, L1, L2, L3...
- Poligonal 2: E02, R03, L1,L2,L3....B06, E06, R02,L1, L2, L3... B07, E07,R06, L1, L2, L3...

Las dos poligonales, parten de dos estaciones de coordenadas conocidas (bases de referencia) y finalizan en otras dos estaciones de coordenadas no conocidas.

Dependiendo de la situación de los puntos inicial o final las poligonales pueden clasificarse en varios tipos:

- Cerradas: El punto inicial y el punto final de la poligonal coinciden en un vértice común cuyas coordenadas pueden ser conocidas o desconocidas.
- Abiertos: El punto inicial y el punto final de la poligonal no coinciden en el mismo vértice y por ello, las coordenadas de la primera estación no son las mismas que las coordenadas de la última.

Dentro de este grupo y en función de si son conocidos o no las posiciones del punto inicial y final encontramos dos tipos de poligonales:

- Encuadrados: Las posiciones de los puntos inicial y final aun siendo distintas, se conocen a priori.
- Colgados: Tan solo se conocen las coordenadas del punto inicial mientras que las del punto final se desconocen.

Además estas pueden ser clasificadas según el sistema de orientación adoptado dividiéndose en dos grupos diferenciados:

- Itinerarios orientados: se desarrolla la poligonal con la condición de que las desorientaciones en cada una de las estaciones serán constantes, o en por lo contrario orientación siempre nula.
- Itinerarios no orientados: En este supuesto se evalúan las distintas lecturas hasta encontrar los datos necesarios para la definición de las coordenadas.

Atendiendo a la metodología descrita, en este caso se trata de una poligonal abierta, colgada no orientada, ya que se parte de una base conocida a priori midiendo con desorientación hasta una base final desconocida.

En los dos itinerarios se ha dejado una distancia entre bases lo más homogénea posible siempre y cuando la geometría de la zona lo permitiera. Otro factor a tener en cuenta es la importancia de la colocación de las estaciones de referencia en lugares despejados, y sin tránsito de vehículos que posibiliten su óptima medición mediante GPS y a su vez puedan perdurar el máximo tiempo posible en el terreno sin su posible manipulación.

4.4.2. Material utilizado

Para materializar las bases en el terreno se han utilizado clavos de acero clavados al asfalto con un martillo en lugares estratégicos sin causar daños al terreno.

Para acabar de resaltar la posición de las bases se ha utilizado spray de color amarillo, utilizado de forma correcta y sostenible ya que se debe evitar en todo momento su mal uso, respetando el medio ambiente lo máximo posible.

4.5. OBSERVACIÓN DE LA RED

Este apartado consta de las siguientes partes:

- Trabajos de campo con GPS.
- Cálculo de los datos GPS.
- Trabajos de campo con estación topográfica.
- Cálculo de los datos con estación topográfica.

4.5.1. Trabajos de campo con gps

La red de bases desde las que se realizaron todas las observaciones objeto de este trabajo fin de grado, fueron medidas con un receptor GPS Leica GS-10; CS-15, de doble frecuencia.

El conjunto de observaciones se realizaron mediante la metodología GPS RTK “Real Time Kinematic”, tomando como fijo la solución de red de la Red GNSS de la Comunidad Autónoma de Cantabria.

Cada uno de los vértices topográficos forma base topográfica con el anterior y el siguiente y a fin de limitar el error de dirección durante la observación se realizaron tres grabaciones de coordenadas tomando como válidas las coordenadas medias.

El sistema de referencia utilizado fue el oficial en España para escalas grandes: ETRS-89, proyección UTM, huso 30 y altitudes referidas al Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA), obtenido mediante el modelo de geoide EGM08.

A continuación, se muestra la localización de las bases de referencia:

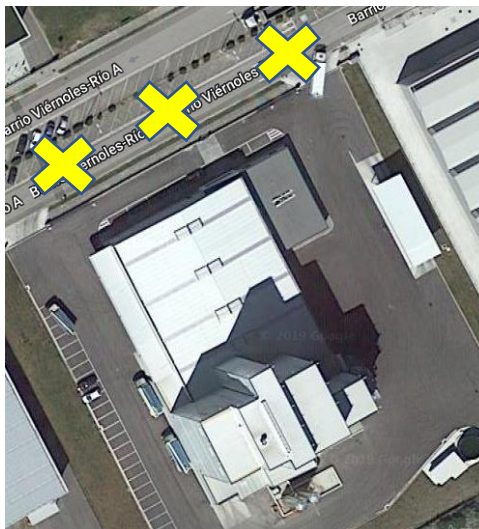


Figura Número 2.27.-Ubicación de las bases de referencia / Fuente (ocw.unican.es)

4.5.2. Cálculo de los datos gps

La geodesia espacial es una técnica que permite el posicionamiento de puntos en la superficie terrestre, mediante la observación de radiaciones electromagnéticas que proceden de satélites tanto naturales como artificiales.

Para el correcto posicionamiento de los puntos sobre la superficie es necesario conocer la posición de los satélites, para ello el receptor localiza automáticamente al menos cuatro satélites de la red y así poder aplicar el método de trilateración. Los satélites emiten señales electromagnéticas cada aproximadamente 1msec, que el receptor recibe e identifica la hora del reloj de cada uno de ellos así como información sobre la constelación. El receptor comprara la señal recibida con la propia y midiendo el desfase de tiempo calcula la distancia a la que se encuentra el satélite. Este proceso se denomina determinación de la pseudodistancia mediante código.

$$D = V(\Delta t)$$

El proceso de trilateración se divide en las siguientes fases:

- La emisión de una primera señal de uno de los satélites nos permite conocer la distancia a la cual se encuentra. Esta distancia forma una esfera en todas direcciones, por lo que la posición GPS se encontrará en algún punto de esa esfera de radio la distancia.
- Al recibir una segunda señal, obtenemos una segunda esfera, la cual se intersecta con la primera, limitando el posicionamiento del GPS en una circunferencia (resultado de la intersección de dos esferas).
- La tercera señal, reduce las posibilidades en los dos puntos de intersección de la circunferencia con la nueva esfera.
- El cuarto satélite es el que determina uno de los puntos que se forman con la nueva intersección, obteniendo así la posición del receptor GPS.

4.5.3. Trabajos de campo con estación topográfica

Para llevar a cabo la toma de datos, se comienza el trabajo de campo estacionando una estación total topográfica total (ETT) en la base elegida. El estacionamiento, se realiza colocando el trípode, haciendo que la base éste quede aproximadamente sobre el punto escogido para el estacionamiento, tratando que la base esté lo más paralela al terreno posible. Posteriormente, se acopla la ETT a la base por medio del tornillo de la misma. Estando ya fijada, posicionaremos la ETT de modo que la plomada laser coincida en el punto seleccionado.

Mediante el nivel convencional que tiene la estación, se nivela haciendo coincidir que la burbuja del nivel quede dentro del círculo del mismo mediante la corrección de la altura en las patas del trípode. Una vez realizado lo dispuesto anteriormente, se nivelan los niveles digitales de la ETT y se mide la altura del aparato.

A la hora de hacer mediciones, para conseguir de una manera clara el volcado de datos en un ordenador la estación permite la introducción de una serie de códigos que facilitan la correcta identificación de los diferentes observables en campo.

El **patrón de códigos** elegidos en la medición es el siguiente:

1. **N0:** Nombre del trabajo; Agro 1, de manera que esté claro el orden de los ficheros .txt que se van a generar para que no existan problemas a la hora de recopilar los datos para llevar a cabo el cálculo.
2. **E0:** Para determinar el punto en el que se realiza el estacionamiento (B1, si se estaciona en la base B01).
3. **I0:** Para recoger la altura del instrumento en cada estacionamiento.
4. **R0:** Con este código el punto al cual se hace referencia (R01)
5. **99/100:** Para diferenciar las lecturas en Circulo Directo (99) y Circulo Inverso (100).

Una vez recopilados todos los datos midiendo y grabando de manera automática en la estación total, se obtienen las lecturas de los ángulos horizontales, los ángulos verticales y las distancias, así como la altura del aparato.



Figura Número 2.28.-Toma de datos con ETT

En este caso y debido a las dimensiones de la nave, no ha sido utilizado el prisma, directamente la puntería va dirigida al punto de medición.

La estación total utilizada es de la marca Leica, modelo TS02, con las siguientes características:

- Sensibilidad: 20cc
- Aumentos: 30
- Apreciación: 3cc
- Distanciómetro: 3 mm + 3 ppm.

El trabajo ha consistido en realizar primero una poligonal en un lado de la nave y al otro lado la otra, empezando por la estación E03 y orientando hacia R01, para seguir con la lectura de L1. Seguidamente se estacionó en B03 y se leyó a B04 y L2 respectivamente y así sucesivamente hasta completar la poligonal. Al tiempo que se realizaba la poligonal en cada uno de los estacionamientos se realizaban radiaciones de aproximadamente 100 puntos. Las poligonales se han realizado aplicando la regla Bessel eliminando así los errores sistemáticos del aparato. Para la elaboración del MDT se ha realizado un croquis de los puntos tomados en cada base indicándolos en fotos de la nave objeto de estudio lo cual facilitó mucho labor del dibujo en AutoCad.

4.5.4. Cálculo de los datos topográficos

Una vez recogidos los datos en campo, se procede al trabajo en gabinete.

En primer lugar se vuelcan los datos recogidos en campo de la estación topográfica al ordenador. Los archivos son archivos txt, recogidos en diferentes documentos uno por cada día de trabajo.

Ya teniendo la información en el ordenador se procede al cálculo de coordenadas mediante la resolución de la poligonal en Excel.

Actualmente existen gran variedad de herramientas informáticas para llevar a cabo trabajos topográficos, que permiten el cálculo y posterior representación de los puntos de forma casi automática, uno de los inconvenientes es que no suelen ser de libre difusión.

Debido a ello en este caso se utilizan programas de “libre” difusión, que no siendo específicamente topográficos permiten el cálculo y la posterior representación.

Las herramientas que se llevan a cabo son un editor de textos (Bloc de notas), y una hoja de cálculo (Excel) ambos pertenecientes a la plataforma informática de Microsoft Office, siendo una de las más extendidas y estando disponible para cualquier usuario.

En primer lugar, la utilización de un editor de textos permite la identificación de los datos de campo recogidos, así como la corrección de errores cometidos en la captación de observables.

Por ejemplo: nombre de la estación, altura del instrumento, referencias, alturas del prisma, nombres de puntos etc.

Los ficheros que generan las estaciones topográficas se caracterizan por tener formato ASCII, lo cual permite importar los ficheros de manera sencilla a cualquier editor de textos que previamente se encuentre instalado en el equipo.

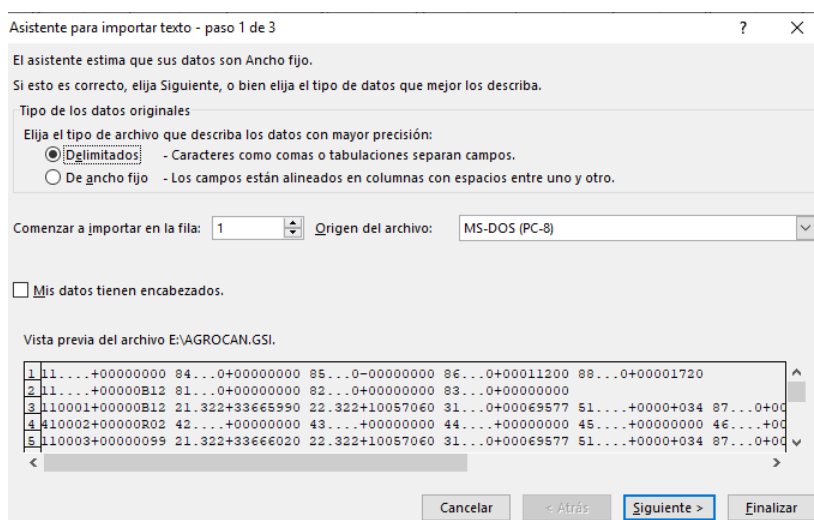
Una vez generado un Bloc de notas con todos los ficheros y subsanado los errores, se guarda con otro nombre o extensión para conservar siempre los datos originales.

Mediante las hojas de cálculo se pueden programar expresiones matemáticas que permiten el cálculo de coordenadas de la nube de puntos importada.

Para realizar la importación de datos se abre Excel con una hoja de cálculo vacía y a continuación se elige la opción abrir fichero dentro del menú principal, desplegándose una ventana, en la cual hay que elegir la opción abrir todos los archivos y buscar en la carpeta en la que se encuentre el fichero, el fichero objeto y abrirle.

Puesto que el fichero que se desea abrir no tiene extensión propia de Excel, aparecen una serie de pantallas solicitando información relativa a la información del fichero como se muestra a continuación:

En la primera solicita el tipo de campo y su ancho específico.



Asistente para importar texto - paso 1 de 3

El asistente estima que sus datos son Ancho fijo.
Si esto es correcto, elija Siguiente, o bien elija el tipo de datos que mejor los describa.

Tipo de los datos originales

Elija el tipo de archivo que describa los datos con mayor precisión:

☒ Delimitados - Caracteres como comas o tabulaciones separan campos.
☐ De ancho fijo - Los campos están alineados en columnas con espacios entre uno y otro.

Comenzar a importar en la fila: 1 Origen del archivo: MS-DOS (PC-8)

☐ Mis datos tienen encabezados.

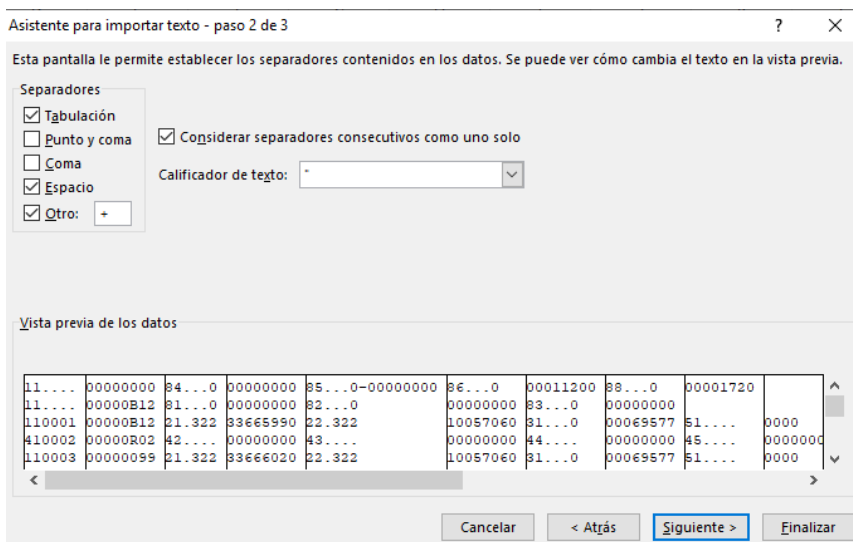
Vista previa del archivo E:\AGROCAN.GSI.

1	11....+00000000	84....0+00000000	85....0-00000000	86....0+00011200	88....0+00001720
2	11....+00000B12	81....0+00000000	82....0+00000000	83....0+00000000	
3	110001+00000B12	21.322+33665990	22.322+10057060	31....0+00069577	51....+0000+034 87....0+00
4	110002+00000R02	42....+00000000	43....+00000000	44....+00000000	45....+00000000 46....+00
5	110003+00000099	21.322+33666020	22.322+10057060	31....0+00069577	51....+0000+034 87....0+00

Cancelar < Atrás Siguiente > Finalizar

Figura Número 2.29.-Tipología de campo

En la siguiente paleta se fijan los criterios con los que se realizarán la separación entre los campos de una misma fila, determinándose por tanto las columnas.



Asistente para importar texto - paso 2 de 3

Esta pantalla le permite establecer los separadores contenidos en los datos. Se puede ver cómo cambia el texto en la vista previa.

Separadores

☒ Tabulación
☐ Punto y coma
☐ Coma
☒ Espacio
☒ Otro: +

☒ Considerar separadores consecutivos como uno solo

Calificador de texto: -

Vista previa de los datos

11....	00000000	84....0	00000000	85....0-00000000	86....0	00011200	88....0	00001720	
11....	00000B12	81....0	00000000	82....0	00000000	83....0	00000000		
110001	00000B12	21.322	33665990	22.322	10057060	31....0	00069577	51....	0000
110002	00000R02	42....	00000000	43....	00000000	44....	00000000	45....	00000000
110003	00000099	21.322	33666020	22.322	10057060	31....0	00069577	51....	0000

Cancelar < Atrás Siguiente > Finalizar

Figura Número 2.30.-Separación de campos

En la última paleta se definen el tipo y formato de los datos en cada campo.

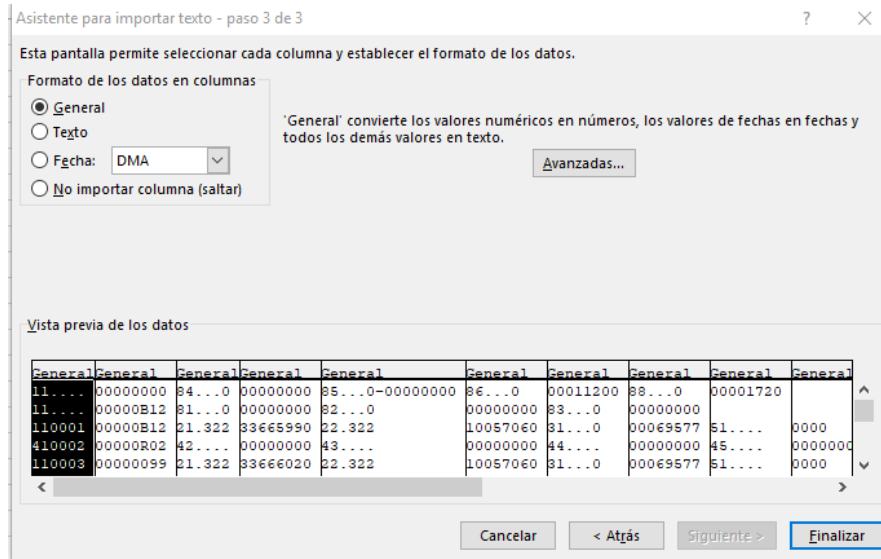


Figura Número 2.31.-Tipo de formato

Al finalizar, aparecen los datos estructurados por filas y columnas.

A continuación se crea una nueva tabla donde se calculan las coordenadas a partir de los datos obtenidos en campo. Para ello es necesario conocer los procedimientos manuales para dicho cálculo.

En primer lugar es necesario calcular la desorientación de cada estación, los acimutes a cada punto y su distancia reducida mediante las expresiones siguientes:

$$\theta_E^P = \varepsilon_E + L_E^P$$

$$\varepsilon_E = \theta_E^{REF} - L_E^{REF}$$

$$D = D_g \text{ Sen } V$$

Una vez calculados los acimutes y distancias reducidas únicamente es necesario calcular las coordenadas con las expresiones siguientes:

$$X_P = X_E + D_E^P \text{ Sen } \theta_E^P$$

$$Y_P = Y_E + D_E^P \text{ Cos } \theta_E^P$$

$$Z_P = Z_E + t_E^P + i_E - m_P$$

El resultado es una hoja de cálculo con cinco columnas en las que se diferencian: número de punto, coordenada “x”, coordenada “y”, coordenada “z” y código como se muestra a continuación.

Autora: Cristina Diego Soroa

	A	B	C	D	E
4	1	416003,387	4797717,030	73,844	CARAA
5	2	416003,391	4797717,036	77,832	CARAA
6	3	416001,635	4797716,105	76,118	CARAA
7	4	416001,641	4797716,117	74,894	CARAA
8	5	415999,846	4797715,182	74,898	CARAA
9	6	415999,861	4797715,177	76,118	CARAA
10	7	415995,737	4797713,024	76,118	CARAA
11	8	415993,960	4797712,103	74,887	CARAA
12	9	415993,960	4797712,088	76,108	CARAA
13	10	415991,322	4797710,723	76,125	CARAA
14	11	415988,831	4797709,420	76,108	CARAA
15	12	415988,843	4797709,419	73,927	CARAA
16	13	415991,343	4797710,729	73,924	CARAA
17	14	415991,344	4797712,064	76,779	CARAA
18	15	415990,059	4797711,423	76,774	CARAA
19	16	415989,104	4797710,932	76,774	CARAA
20	17	415987,948	4797710,333	76,774	CARAA
21	18	415983,994	4797708,264	76,776	CARAA
22	19	415983,421	4797707,938	76,791	CARAA
23	20	415983,959	4797706,912	76,785	CARAA
24	21	415983,967	4797706,903	78,498	CARAA
25	22	415983,964	4797706,906	80,802	CARAA
26	23	415983,450	4797707,981	80,800	CARAA

Figura Número 2.32.-Códigos y coordenadas del levantamiento

Una vez obtenidas las coordenadas se procede a la creación del MDT.

4.6. GENERACIÓN DEL MDT

Para la elaboración de un MDT se han utilizado las herramientas TopoCal y AutoCad.

El primer paso que requiere la generación de un modelo digital del terreno es la importación de la Nube de Puntos, para ello la aplicación dispone de un procedimiento automático con una amplia gama de posibilidades en este caso se ha realizado a través de una plantilla Excel, dado que es un método muy sencillo y se han realizado los cálculos en la hoja Excel, aunque también se puede hacer mediante la importación de datos por medio del bloc de notas. Para importar los datos a través de la plantilla de Excel, tan solo se debe copiar y pegar los datos en editor de puntos de Excel que tiene TopoCal, atendiendo únicamente que las comas correspondan a los decimales y los puntos a los millares.

Una vez importados los datos la aplicación permite la representación de poli-líneas que enlazan los puntos de forma manual o automática, es decir reconoce la definición geométrica de los tipos de línea que le hemos adjudicado. Por ello esta aplicación es muy eficaz a la hora de unir puntos que definen una misma línea, ahorrando una gran labor en la siguiente herramienta; AutoCad.

Cuando el programa nos haya definido todas las líneas del modelo, se exporta directamente a Autocad.

Una vez el modelo haya sido importado, se procede a la definición más precisa del mismo realizando intersecciones para hallar los puntos que no han sido posible observar con la ETT e ir definiendo las caras del MDT. El trabajo en Autocad es más sencillo elaborando capas para los diferentes puntos que forman la nave, ya que facilita mucho los procesos de edición de los mismos, quedando solo visibles las capas que se editen en un momento preciso. De igual forma cada capa tiene adjudicado un color para la rápida identificación del tipo de punto.

Una vez hecho esto se obtiene una estructura alámbrica como la que se muestra a continuación.

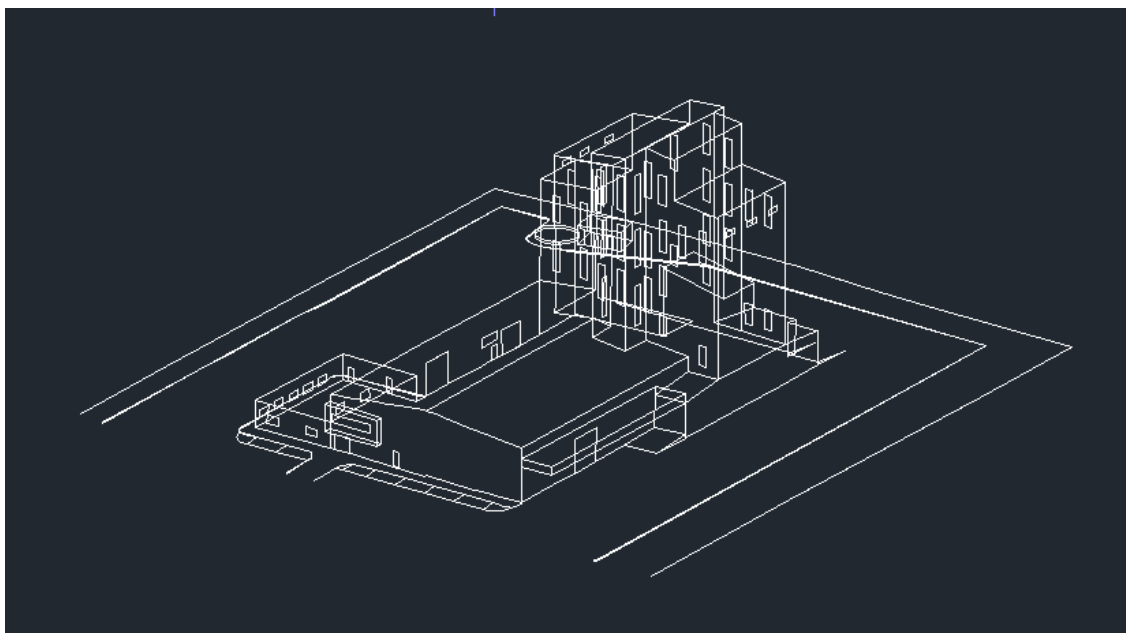


Figura Número 2.33.-Estructura alámbrica del modelo

El último paso para la obtención de un modelo que permita medir el área y el volumen de la nave es hacer de la estructura alámbrica un modelo sólido. Para ello se crean regiones de las diferentes caras del modelo extruyéndolas hasta formar un cuerpo sólido. El resultado se muestra en la siguiente imagen.

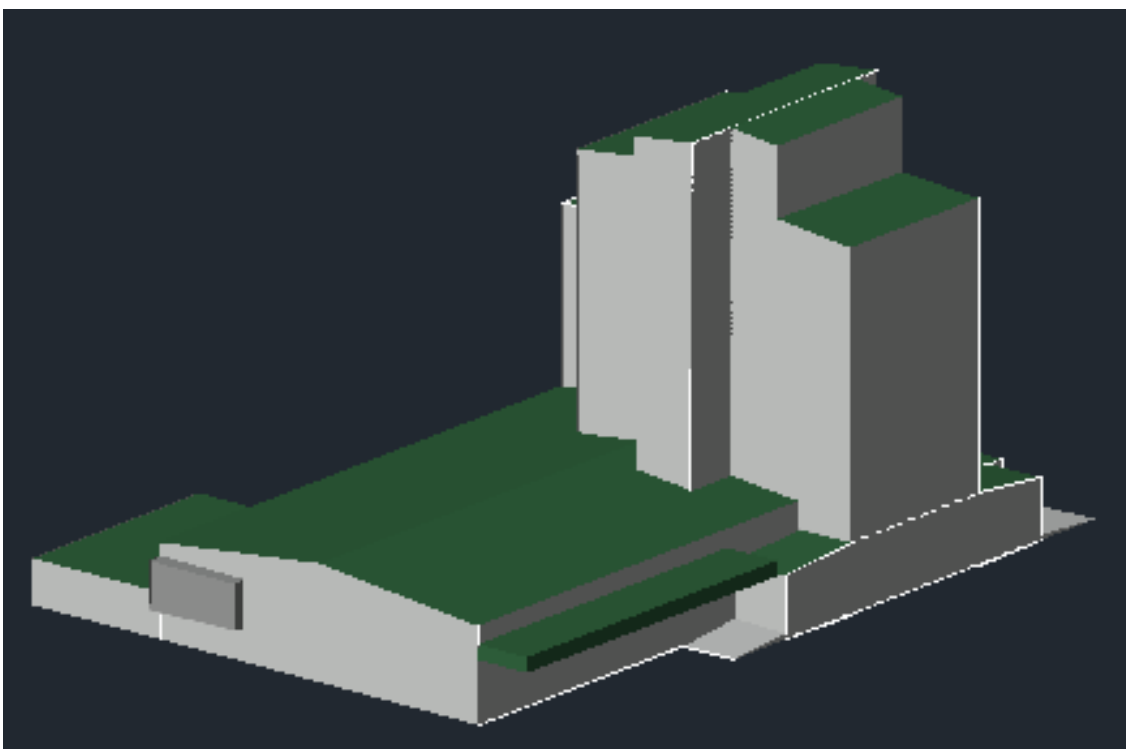


Figura Número 2.34-Modelo nave Agro Cantabria

CAPÍTULO III: LEVANTAMIENTO MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA CON DRON

ÍNDICE

1. FOTOGRAMETRÍA	64
1.1. DEFINICIÓN DE FOTOGRAMETRÍA.....	64
1.2. EVOLUCIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA	64
1.3. INTRODUCCIÓN A LA FOTOGRAMETRÍA	65
1.3.1. Escala de una fotografía.....	65
1.3.2. Principio de la visión estereoscópica	67
1.3.3. Método general de la fotogrametría.....	67
1.3.3.1. Orientación interna	68
1.3.3.2. Orientación externa	69
1.4. DIFERENCIAS ENTRE FOTOGRAFÍA AÉREA Y MAPA	69
1.5. APLICACIONES CARTOGRÁFICAS DE LA FOTOGRAMETRÍA	69
2. DRONES	70
2.1. DEFINICION DE UAVs.....	70
2.2. BREVE HISTORIA DE LOS UAVs	70
2.3. MARCO LEGAL	72
2.4. CLASIFICACION UAVs.....	72
2.4.1. UAVs de ala rotatoria.....	72
2.4.2. UAVs de ala fija	73
2.5. PRINCIPALES ELEMENTOS QUE COMPONEN UN DRON	73
2.6. APLICACIONES	75
3. CAMARAS MÉTRICAS	77
4. CLASIFICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA	79
5. FOTOGRAMETRÍA DIGITAL	80
5.1. FUNDAMENTOS FOTOGRAMETRÍA DIGITAL.....	80
5.2. CONCEPTO IMAGEN DIGITAL	80
5.3. RESOLUCIÓN DE IMÁGENES DIGITALES	81
5.4. CAPTURA DE IMÁGENES DIGITALES.....	82
5.4.1. Sensores de captura de imágenes digitales	82
5.4.2. La cámara fotogramétrica digital	82
5.5. ORIENTACIÓN INTERNA DIGITAL	83
5.6. ORIENTACIÓN INTERNA DE UNA IMAGEN DE CÁMARA DIGITAL	84

5.7. CORRELACIÓN DE IMÁGENES.....	86
5.7.1 Correlación automática de imágenes	87
5.7.2. Métodos de correlación	87
5.7.3. Geometría epipolar	88
5.8. ORIENTACIÓN EXTERNA	89
5.8.1. Puntos de apoyo	91
5.8.2. Ecuaciones de colinealidad	92
5.8.3. Resección espacial	94
5.8.4. Autocalibración	96
5.8.5. Intersección espacial	97
5.8.6. CPS/INS aerotransportado	98
5.8.7. Rectificación de imágenes	99
5.8.8. Remuestreo de imágenes	100
5.8.9. Normalización de imágenes	101
5.9. ORTOFOTOGRAMETRÍA DIGITAL.....	101
5.9.1. Concepto de ortorectificación	101
5.9.2. Métodos de ortorectificación digital	103
6. TOMA DE DATOS CON DRON	105
6.1. INTRODUCCIÓN.....	105
6.2. CONDICIONES ANTES DE REALIZAR UN VUELO CON DRON	106
6.3. COMPROBACIONES	107
6.4. PLANIFICACIÓN DEL VUELO	107
6.5. TRABAJO EN GABINETE	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Número 3.1.-Escala de vuelo.....	66
Figura Número 3.2.-Principio de visión estereoscópica.....	67
Figura Número 3.3.-Intersección de rayos proyectivos.....	68
Figura Número 3.4.-Orientación interna.....	68
Figura Número 3.5.-Modelo de blanco aéreo Queen Bee.....	71
Figura Número 3.6.-Aplicaciones topográficas.....	71
Figura Número 3.7.-Clasificación de los UAV's.....	72
Figura Número 3.8.-Cuadricóptero, modelo Phantom 2.....	73
Figura Número 3.9.-UAV de ala fija, modelo eBee.....	73
Figura Número 3.10.-Brazos dron.....	73
Figura Número 3.11.-Frame dron.....	74
Figura Número 3.12.-Batería.....	74
Figura Número 3.13.-Gimbal.....	75
Figura Número 3.14.-Levantamiento topográfico mediante DRON.....	75
Figura Número 3.15.-Drones en la Minería.....	76
Figura Número 3.16.-Drones actuando en regadíos.....	76
Figura Número 3.17.-Dron actuando en incendio forestal.....	76
Figura Número 3.18.-Dron de mantenimiento de líneas eléctricas.....	77
Figura Número 3.19.-Dron para inspección de fachadas.....	77
Figura Número 3.20.-Clasificación de la fotogrametría.....	79
Figura Número 3.21.-Píxel de una imagen.....	81
Figura Número 3.22.-Resolución espacial.....	81
Figura Número 3.23.-Cámara fotogramétrica digital.....	83
Figura Número 3.24.-Reconstrucción del haz perspectivo de una imagen.....	83
Figura Número 3.25.-Correcciones por esfericidad terrestre y por refracción atmosférica.....	86
Figura Número 3.26.- Identificación de puntos homólogos en dos imágenes.....	87
Figura Número 3.27.- Matriz patrón.....	87
Figura Número 3.28.-Línea epipolar.....	89
Figura Número 3.29.-Orientación externa de una imagen.....	90
Figura Número 3.30.-Giros del sistema de coordenadas imagen.....	90
Figura Número 3.31.-Distribución de los puntos en apoyo continuo.....	91
Figura Número 3.32.-Apoyo aerotriangulación.....	92
Figura Número 3.33.- Concepto de Intersección espacial.....	97
Figura Número 3.34.- Rectificación de una imagen aérea.....	99

Figura Número 3.35.-Remuestreo de imágenes.....	100
Figura Número 3.36.-Normalización de una imagen.....	101
Figura Número 3.37.-Imagen en perspectiva cónica.....	102
Figura Número 3.38.-Imagen en perspectiva ortogonal.....	102
Figura Número 3.39.-Principio metodológico de la rectificación digital.....	103
Figura Número 3.40.-Problema debido a la presencia de edificios en la ortorectificación.....	104
Figura Número 3.41.-Ortoimagen a partir de MDE.....	104
Figura Número 3.42.-Aeronave H520.....	105
Figura Número 3.43.-Estación de Tierra ST16S.....	106
Figura Número 3.44.-Vuelo con dron a 45°.....	108
Figura Número 3.45.-Añadir fotos en Agisoft.....	109
Figura Número 3.46.-Fotografías orientadas.....	110
Figura Número 3.47.- Creación de la nube de puntos.....	110
Figura Número 3.48.-Nube de puntos.....	111
Figura Número 3.49.- Creación de la malla.....	111
Figura Número 3.50.- Opciones de textura elegidas.....	112
Figura Número 3.51.-Posicionamiento de un punto de apoyo.....	112
Figura Número 3.52.- Optimizar orientación de las cámaras.....	113
Figura Número 3.53.-Vista principal Modelo Digital de Elevaciones.....	113
Figura Número 3.54.- Vista trasera Modelo Digital de Elevaciones.....	114
Figura Número 3.55.- Vista lateral Modelo Digital de Elevaciones.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla Número 3.1.-Parámetros fundamentales de una cámara métrica.....	79
Tabla Número 3.2.-Certificado de calibración cámara digital.....	84
Tabla Número 3.3.-Coordenadas de los puntos de apoyo.....	109

1. FOTOGRAMETRÍA

1.1. DEFINICIÓN DE FOTOGRAMETRÍA

La Fotogrametría, según la Sociedad Americana de Fotogrametría (ASP, 1980), actual Sociedad Americana Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) define la fotogrametría como: "...arte, ciencia y tecnología de obtener información fiable de objetos físicos o del medio ambiente, a través de procesos de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos."

1.2. EVOLUCIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA

El fundamento geométrico de la fotogrametría se estableció antes de que Daguerre descubriera la fotografía en 1839. En 1759, Lambert estableció los fundamentos para resolver el problema inverso de la perspectiva y Gay Lussac y Arago, en un informe al Gobierno francés, con motivo del invento de la fotografía, llamaron la atención sobre la posibilidad de reproducir objetos fotográficos; pero el verdadero fundador de la fotogrametría fue el coronel francés Laussedat, que a partir del año 1852 consiguió obtener planos exactos de edificios o de pequeñas extensiones de terreno por medio de fotografías.

El método de Laussedat es conocido con el nombre de fotogrametría ordinaria y estuvo en vigor durante casi medio siglo; su principal obstáculo era la dificultad de identificación de un mismo punto en fotografías obtenidas desde emplazamientos distintos; este inconveniente se atenuó con el descubrimiento del principio de los planos nucleares, primero por el general español Terrero y veintidós años después por el austriaco Hauck, conocido con el nombre de teorema de terrero-Hauck, que aún sigue siendo el fundamento de los más modernos métodos de restitución.

La fotogrametría no fue práctica hasta 1910, en que Pulfrich aplicó el principio de la visión en relieve para efectuar medidas estereoscópicas por medio del aparato de su invención, el estereocomparador que produjo verdadera revolución en el concepto que hasta entonces se tenía de las posibilidades fotogramétricas; pero el método era lento por tener que deducir numéricamente las coordenadas punto por punto.

Alcanzó la fotogrametría terrestre su plenitud en 1910 gracias al teniente austriaco von Orel, inventor del estereautógrafo, aparato de restitución automática.

Estas tres etapas de la fotogrametría, ordinaria, de estereofotogrametría analítica y estereofotogrametría automática, se refieren a fotogrametrías obtenidas desde tierra y constituyen los métodos de fotogrametría terrestre. Después de algunos ensayos para obtener fotografías desde globos o cometas, durante la guerra de 1914 surgió la necesidad de obtener fotografías aéreas, más la solución, sin embargo, no fue fácil. En la fotogrametría terrestre el aparato fotográfico está fijo y por métodos puramente topográficos es posible situar en el plano el punto estación, pero en la fotogrametría aérea la cámara está en movimiento y es indispensable conocer su posición exacta en el momento de hacer la fotografía antes de restituirla.

Se pensó primero en resolver un problema de Photenot en el espacio apoyándose en puntos conocidos, pero en este caso la resolución del vértice de pirámide conduce a cálculos sumamente complejos que precisan varias aproximaciones sucesivas, método incompatible con el trabajo diario; durante largo tiempo se dirigieron las investigaciones

a resolver de un modo práctico este problema de la pirámide, y con objeto de simplificar comenzaron a ensayarse métodos giroscópicos para disminuir la libertad de movimiento de las cámaras fotográficas, y cuando ya se preveía alguna solución satisfactoria en ese sentido se abandonó el sistema y se obtuvo la solución resucitando el viejo teorema de terrero-hauck o de los planos nucleares, que permitió conseguir la orientación relativa de cada dos fotografías consecutivas por métodos exclusivamente ópticos y mecánicos. De este modo surgió en 1922 el primer restituidor automático de fotogrametría aérea, debido al Prof. Hugershoff, si bien había que guardar con el algunas restricciones, y en 1923 fue construido el estereoplanígrafo de Bauerfeld-Zeiss, alemán, seguido de aparatos franceses, italianos y suizos, con los que pudo darse como resuelto el problema de la fotogrametría aérea, hasta llegar a los grandes restituidores analógicos de primer orden, con los que se pensaba haber llegado al final de la evolución, cuando inopinadamente dejaron de fabricarse, siendo sustituidos por restituidores analíticos y a su vez a finales de los 90 comienzan a ser sustituidos por los digitales.[10]

1.3. INTRODUCCIÓN A LA FOTOGRAMETRÍA

Al observar la imagen fotográfica de un objeto podemos obtener información cuantitativa y cualitativa del mismo.

Existen dos métodos para medir magnitudes angulares, lineales o superficiales sobre una fotografía: el método directo y el método analítico.

El método de medición directo consiste en superponer un patrón adecuado para la magnitud a medir sobre la fotografía y estimar la magnitud buscada. Para restituir la magnitud real debemos tener datos adicionales como la escala, o la relación entre la unidad lineal en el objeto y en el patrón.

Esto se podrá hacer de manera digital. Cuando se dispone la imagen en dicho formato, podremos realizarlo de manera digital mediante herramientas capaces de medir longitudes. De igual forma, existen patrones para medir directamente superficies y ángulos, círculos graduados y planimétricos, por ejemplo. Como un ángulo es una relación entre dos magnitudes lineales del objeto, su medición no se ve afectada por la escala.

El método de medición analítico consiste en dotar de coordenadas en un sistema de referencia único adecuado a los puntos de los elementos a medir, calculando seguidamente las magnitudes a partir de las coordenadas utilizando los principios de la geometría.

Una forma sencilla de definir el sistema de referencia en la fotografía, podría ser considerando el origen en la esquina inferior izquierda, siendo el eje de abscisas el lado inferior y por lo tanto el eje de ordenadas el lado izquierdo, de forma que en la orientación de la fotografía el largo coincida con el lado inferior, el alto con el izquierdo y los objetos no se estén invertidos.[11]

1.3.1. Escala de una fotografía

Se define escala de una imagen fotogramétrica a la relación entre la medida de la magnitud de un elemento lineal representado en la imagen y su magnitud real.

Al medir sobre una fotografía siempre existirá un error relacionado con el límite de percepción, con la mínima magnitud que podamos apreciar.

La precisión de la magnitud real restituída dependerá del límite de percepción sobre la imagen y de la escala de la imagen.

En una imagen fotográfica pueden aparecer un gran número de objetos a diferentes escalas.

Sin embargo, para una imagen fotográfica entenderemos por escala aquella que corresponde al objeto a tratar en el proceso fotogramétrico.

La escala de una imagen fotográfica depende de dos variables: la separación entre el objeto y el punto de toma, y la separación entre el punto de toma y el plano sobre el que se proyecta la imagen:

$$E = \frac{f}{h}$$

Donde H es la altura de vuelo y f la focal de la cámara.

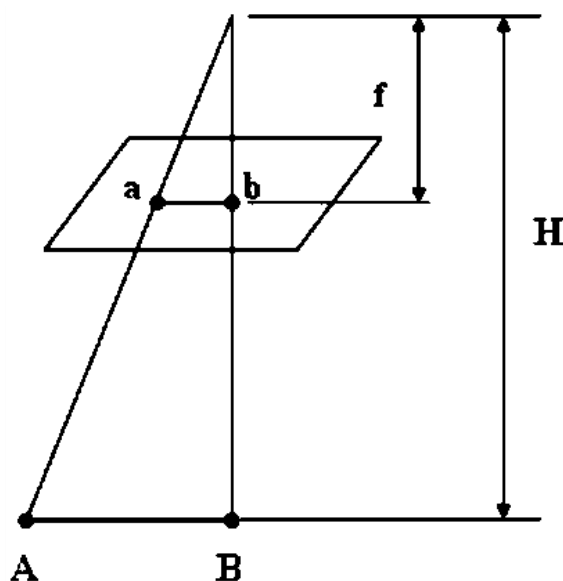


Figura Número 3.1.-Escala de vuelo

Como se puede ver, la escala no será constante en toda la imagen puesto que la altura de vuelo respecto al terreno fotografiado tampoco lo es. Manteniendo constante la altura de vuelo, se disminuye la distancia focal, representados los objetos de menor tamaño y por lo tanto la escala será menor. Cuando se mantiene constante la distancia focal y se aumentamos la altura de vuelo, la escala también será menor.

Es decir, para una mayor precisión hay que aumentar la escala, disminuyendo la altura de vuelo y aumentando la distancia focal, puesto que el formato del fotograma es fijo, al reducir la altura de vuelo se necesitan más fotogramas para cubrir el objeto deseado.[11]

1.3.2. Principio de la visión estereoscópica

La obtención de información cuantitativa tridimensional de un objeto, partiendo de dos imágenes se puede conseguir a partir del principio en el cual se basa la visión humana.

Este principio es el denominado visión estereoscópica: Al observar un objeto los ojos registran dos imágenes distintas de este objeto, generando el cerebro una imagen tridimensional, un modelo estereoscópico, a partir del procesado de las mismas.

La distancia entre las pupilas de los ojos es denominada distancia interpupilar, esta adopta un valor medio de 65 mm.

Para producirse sensación de relieve el ángulo de convergencia entre las dos visuales debe ser $>30''$. Para los ángulos $<30''$ las visuales son casi paralelas por lo cual el cerebro no es capaz de percibir relieve.

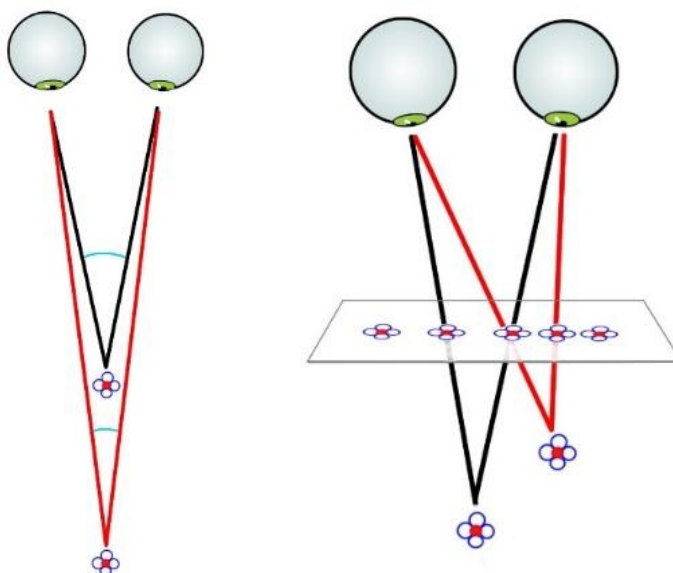


Figura Número 3.2.-Principio de visión estereoscópica / Fuente (dptodibujoiesrodiguezmarin.blogspot.com)

Se define visión estereoscópica artificial como la sensación de relieve que tiene una persona observando dos fotografías de un mismo objeto desde dos puntos de vista, desde los ojos a través del estereoscopio. [11]

1.3.3. Método general de la fotogrametría

La necesidad de obtener información en tres dimensiones a partir de información en dos dimensiones o lo que es lo mismo, la necesidad de conocer la posición, tamaño y dimensiones de los objetos, lleva al estudio de la fotogrametría.

El fundamento de la fotogrametría consiste en la obtención de dos fotografías aéreas verticales sucesivas, tomando un punto común en el terreno que, a partir de la restitución de los haces de proyección permite obtener las coordenadas de dicho punto en ambas fotografías desde un eje de referencia relativo y así obtener semejanzas geométricas entre imágenes. Como se puede observar en la siguiente imagen, el punto $P(x,y,z)$ que está ubicado en el terreno se proyecta a la fotografía. Coinciden en la vertical, el centro de la fotografía y el nadir.

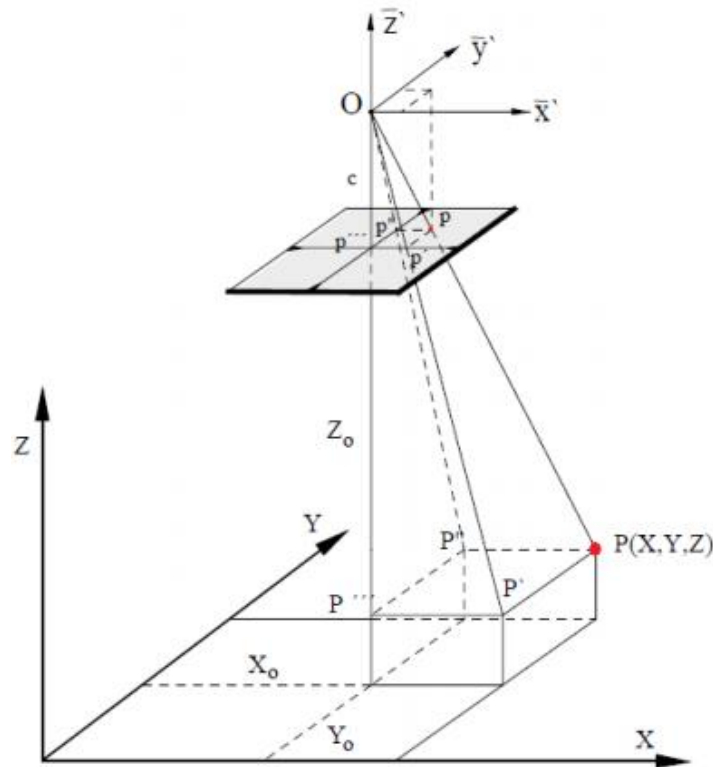


Figura Número 3.3.-Intersección de rayos proyectivos / Fuente (ign.unne.edu.ar)

La correcta definición de los dos sistemas de referencia imagen se consigue representando la geometría de cada una de las tomas, esto se conoce como orientación interna mientras que la transformación de los sistemas de referencia imagen, al sistema de referencia objeto, se conoce como orientación externa.[12]

1.3.3.1. Orientación interna

Mediante la orientación interna se reproduce en cada proyector un haz de rayos idénticos al que se impresionó en cada fotografía.

Se consigue conociendo los elementos internos:

- Distancia focal.
- Punto principal.
- Función de distorsión.

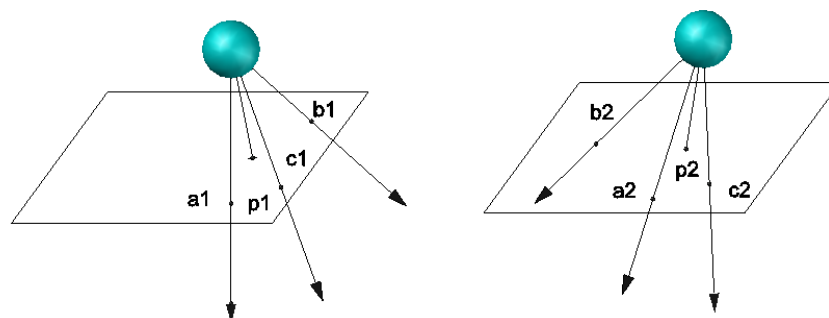


Figura Número 3.4.-Orientación interna

1.3.3.2. Orientación externa

Mediante la orientación externa, se logra que los haces formados en los proyectores mediante la orientación interna estén con respecto al terreno en la misma posición a la que fueron impresionadas las fotografías, constando de dos fases: Orientación relativa y orientación absoluta.[1]

- Orientación relativa:

El objeto de la orientación relativa es colocar los dos haces proyectivos en posición perspectiva. Según la geometría proyectiva, basta la intersección simultánea de cinco pares de rayos homólogos para que todos los otros intersecten.

- Orientación absoluta:

El objeto de la orientación absoluta es ajustar el modelo al sistema de coordenadas del terreno fotografiado. Para ello se da escala al modelo inicialmente y después se lleva el modelo a una posición adecuada del eje z.

1.4. DIFERENCIAS ENTRE FOTOGRAFÍA AÉREA Y MAPA

Las fotografías aéreas de eje vertical son el resultado de una perspectiva cónica, sujetas a condicionantes geométricos que impiden su empleo como mapa pero que le complementa de una forma muy eficaz.

Existen dos diferencias fundamentales entre la fotografía aérea y el mapa:

1. Diferencia de contenido:

- a) Mientras que la cantidad de información en una fotografía es infinita, un mapa tiene información limitada
- b) En el mapa la información está jerarquizada, y en la fotografía no, además se puede añadir simbología adicional u otros aspectos.
- c) El mapa está confeccionado mediante unas reglas a seguir mientras que la fotografía presenta una información integral y objetiva.

2. Diferencias cuantitativas.

- a) El mapa es una proyección plana, sin embargo, la fotografía es una perspectiva, por lo que no configura un documento con propiedades métricas.
- b) No nos da una información numérica fiable y la información altimétrica no existe a nivel de fotograma aislado.[1]

1.5. APLICACIONES CARTOGRÁFICAS DE LA FOTOGRAMETRÍA

Las aplicaciones cartográficas de la fotogrametría tienen por objeto determinar de forma cuantitativa las magnitudes geométricas; coordenadas, posiciones, volúmenes, superficies ..., pero principalmente la producción cartográfica.

El método fotogramétrico resulta ventajoso respecto al resto de métodos clásicos de observación, incluyendo el GPS.

Presenta las siguientes ventajas:

- Permite realizar levantamientos topográficos en gabinete sin suprimir completamente los trabajos de campo, de forma rápida, económica y precisa.
- Captura de información más densa, disponiendo de mayor información que en métodos topográficos clásicos.
- Permite realizar trabajos en zonas no accesibles para topografía clásica.

En cuanto los ejemplos más destacados de aplicaciones topográficas fotogramétricas se pueden encontrar los siguientes:

- Generación de MDT
- Generación de ortofotografías
- Producción cartográfica 3D a partir de diferentes entidades cartográficas.[11]

2. DRONES

2.1. DEFINICION DE UAVs

El Ministerio de Defensa de los Estados Unidos define “Unmanned Aerial Vehicle” (UAV), en Castellano “Vehículo aéreo no tripulado” (VANT) como:

“Vehículo aéreo motorizado que no lleva a bordo un operador humano, que utiliza fuerzas aerodinámicas para generar la sustentación, puede volar autónomamente o ser tripulado de forma remota, puede ser fungible o recuperable, y que puede transportar una carga de pago letal o no.”

El término UAV ya está en desuso sustituyéndose por el término RPA (Remotely Piloted Aircraft), ambos no llevan tripulación embarcada pero el concepto UAV se acuñó en sus inicios para un uso militar. La diferencia entre ellos es que el UAV no lleva pasajeros pero además puede o no puede estar pilotado por un piloto o lo que es lo mismo, el sistema que lo controla puede ser una computadora, donde no interviene el factor humano, mientras que el RPA es una aeronave pilotada a distancia.

En cuanto a la denominación coloquial, estos vehículos son habitualmente llamados drone (o dron recogido en el Diccionario de la lengua española): significa en inglés literalmente “zángano”

2.2. BREVE HISTORIA DE LOS UAVs

El origen de estos vehículos aéreos no tripulados se remonta a la primera mitad del siglo XIX, cuando Cayley, Stringfellow, George Cayley, los hermanos Wright y otros pioneros de la aviación, construyeron y volaron sus propios modelos de vehículos no tripulados. Estos modelos sirvieron como bancos de pruebas tecnológicos para posteriormente desarrollar modelos de mayor tamaño con piloto a bordo.

El desarrollo de estas aeronaves no tripuladas desde el siglo XIX fue debido principalmente a los fines militares que tenían los diferentes países implicados en las Guerras Mundiales, siendo la Segunda Guerra Mundial el principal estimulante para Estados Unidos y Europa.

El estudio de los UAVs tiene sus inicios en el desarrollo de los torpedos aéreos radio controlados. Las barreras tecnológicas de la aviación no tripulada eran tales como la estabilización automática, la navegación autónoma y el control remoto.

Estas barreras fueron solucionadas por el inventor Elmer Sperry mediante giroestabilizadores integrados, lo que dio paso a los denominados misiles crucero.

Durante la Segunda Guerra Mundial, Gran Bretaña y Estados Unidos abandonan el desarrollo de los misiles crucero para pasarse a trabajar con blancos aéreos (llamados también drones).



Figura Número 3.5.-Modelo de blanco aéreo Queen Bee / Fuente (drones.uv.es)

Pasada la década de los 50 el desarrollo de estas aeronaves se hace notable, siempre en el campo militar. No es hasta día de hoy, cuando los UAVs se han desarrollado con el objetivo de servir también como herramienta para otras funciones, como en este caso aplicaciones topográficas.[12]



Figura Número 3.6.-Aplicaciones topográficas / Fuente (dtonaid.com)

2.3. MARCO LEGAL

El Consejo de Ministros aprobó el Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre, por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto, y se modifican el Real Decreto 552/2014, de 27 de junio, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea y el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea.[13]

Este reglamento contempla los distintos escenarios y requisitos en los que se podrán realizar operaciones aéreas especializadas, vuelos, actividades deportivas, recreativas, de competición o exhibición. Además, las condiciones ahora aprobadas se completan con el régimen general de la Ley 48/1960, de 21 de julio, sobre Navegación Aérea, y establecen las condiciones de operación con este tipo de aeronaves, además de otras obligaciones.[13]

2.4. CLASIFICACION UAVs

La clasificación de los UAVs se puede hacer según diferentes criterios, uno de los más habituales es la distinción entre aeronaves que pueden realizar despegue vertical y las que no pueden. Cuando el despegue es vertical estamos hablando de los de Ala rotativa o Autosustentados, por lo contrario, los que no pueden se clasifican en Ala flexible o Ala fija.

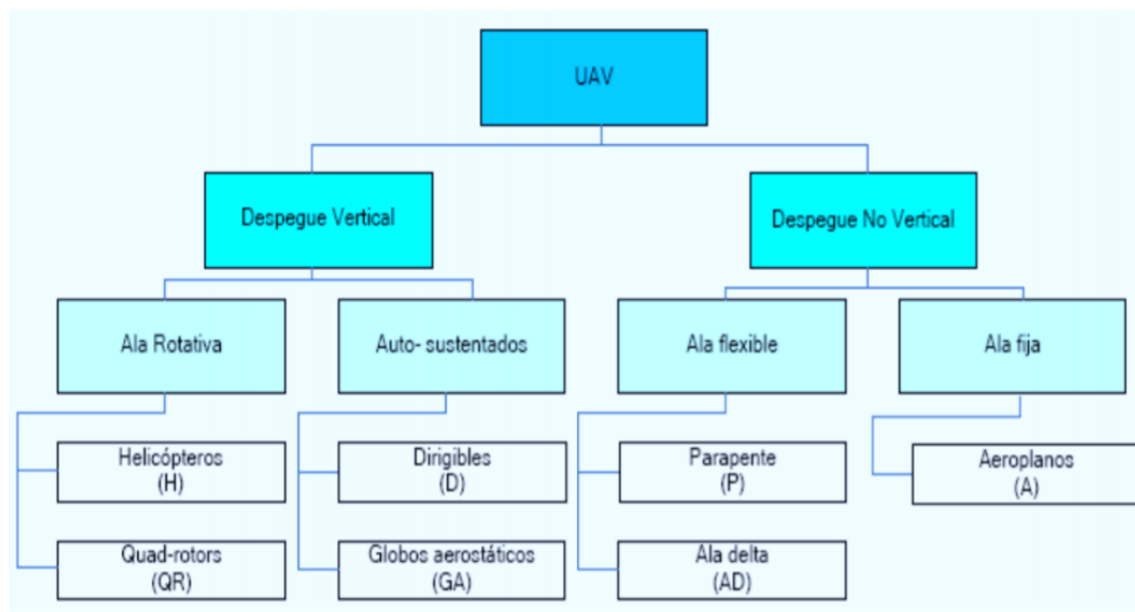


Figura Número 3.7.-Clasificación de los UAV's / Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

2.4.1. UAVs de ala rotatoria

Definidos como multihélices o multirrotores, o lo que es lo mismo, helicópteros que tienen más de dos motores. Atendiendo a sus características la principal ventaja de estas aeronaves es la capacidad de mantenerse estáticos en el aire realizando sus operaciones correspondientes sin tener la necesidad de moverse.

Dentro de este grupo los más utilizados son los cuadricópteros.



Figura Número 3.8.-Cuadricóptero, modelo Phantom 2

2.4.2. UAVs de ala fija

Son los denominados aviones. Su capacidad para planear les lleva a realizar operaciones de más distancia debido a que tienen mayor autonomía de vuelo y alcanzan velocidades mucho mayores que las de un multirrotor.



Figura Número 3.9.-UAV de ala fija, modelo eBee.

2.5. PRINCIPALES ELEMENTOS QUE COMPONEN UN DRON

Como se ha comentado anteriormente, los drones se clasifican en función de sus componentes, número de brazos, ala rotatoria o fija... Por ello se deben tener en cuenta muchas variables:

- Número de brazos

Los drones pueden tener de tres a ocho brazos, dependiendo de la estabilidad y capacidad de movimiento de la que se quiera dotar la aeronave. En función del número de brazos pueden denominarse tricóptero, cuadricóptero, hexacóptero y octocóptero dependiendo de las hélices para las que se haya diseñado. En algunos drones cada brazo consta de una luz de distinto color para poder diferenciar la posición en la que se encuentra y diferenciar los distintos brazos.



Figura Número 3.10.-Brazos dron / Fuente (rconline.com)

- Marco o frame

Se trata del cuerpo del dron, en esta estructura se instalan las demás partes del dron. Pueden tener diferentes diseños y materiales en función del fabricante.



Figura Número 3.11.-Frame dron / Fuente (dronemania.es)

- Motores, controladores de velocidad y hélices

El motor es el componente fundamental de un dron, el cual permite su funcionamiento y mantenerlo en el aire. Los motores se clasifican según donde estén colocados. Pueden ser motores normales (aquellos que tienen el motor colocado en la parte de arriba) o coaxiales (aquellos que tienen los motores arriba y abajo).

Los ESC (Electronic Speed Control) o Controladores de Velocidad Electrónicos son los encargados de regular la potencia eléctrica para permitir un control de giro de los motores.

El giro del motor está conectado a las hélices que permiten su rotación a alta velocidad generando la sustentación de la aeronave.

- Baterías

Las baterías acumulan la energía necesaria para permitir el funcionamiento del equipo. Suelen ser componentes pesados, por ello es necesario que tengan una buena relación peso calidad, maximizando la autonomía del vuelo.

Las baterías Li-Po son las más utilizadas debido a su peso ligero, densidad de energía y su alta tasa de descarga.



Figura Número 3.12.-Batería / Fuente (masquedron.es)

- Gimbal

El gimbal es el sistema de sujeción de la cámara. Este componente garantiza la estabilidad de la cámara a la hora de realizar la captura de imágenes o grabación de la zona en movimiento.



Figura Número 3.13.-Gimbal / Fuente (elvuelodeldron.com)

- Controlador de vuelo

Al controlado de vuelo van conectados todos los componentes electrónicos del dron, lo cual permite controlar todo lo que sucede en el vuelo.

- Estación de tierra

Es un transmisor integral y un receptor que aporta el pleno control del dron durante el vuelo permitiendo al piloto realizar la captura de fotos con facilidad.

- GPS

El gps está conectado al controlador de vuelo permitiendo conocer ubicación, altitud y velocidad de la aeronave en todo momento.[14][15][16]

2.6. APLICACIONES

Actualmente el uso de drones está en constante evolución, siendo muy interesantes las aplicaciones que tienen en diferentes campos de la ingeniería, entre las que se encuentran las siguientes: [17]

- Aplicaciones a la cartografía digital: Como en el caso de levantamientos topográficos mediante técnica fotogramétrica, como la del presente estudio.



Figura Número 3.14.-Levantamiento topográfico mediante DRON

- Controles a la calidad del aire: Integrando sensores ambientales e instrumentos de medida al UAV.
- Minería: Prospección y explotación de recursos minerales.



Figura Número 3.15.-Drones en la Minería

- Agricultura: Uno de los principales ya que tiene numerosas aplicaciones. Como por ejemplo la integración de cámaras multiespectrales permite mediante fotografías, obtener un estudio del terreno, como puede ser su estado hídrico o detección de plagas y a partir de ahí, llevar a cabo un manejo eficiente del agua así como el uso óptimo de fertilizantes.



Figura Número 3.16.-Drones actuando en regadíos

- Ingeniería forestal: Prevención de incendios a través de la detección de puntos calientes.



Figura Número 3.17.-Dron actuando en incendio forestal

- Ingeniería eléctrica: Inspección y mantenimiento de líneas eléctricas así como apoyo en situaciones de emergencia (temporales peligrosos).



Figura Número 3.18.-Dron de mantenimiento de líneas eléctricas

- Ingeniería de edificación: Inspecciones de eficiencia energética de las fachadas de los edificios gracias a la termografía aérea.



Figura Número 3.19.-Dron para inspección de fachadas

3. CÁMARAS MÉTRICAS

Las cámaras fotográficas empleadas en fotogrametría pueden ser clasificadas atendiendo a los siguientes criterios:

Según el tipo de almacenamiento de la información:

- Analógicas: Son cámaras en las que la imagen se registra en un soporte analógico: película, placa de vidrio, etc.
- Digitales: Son cámaras donde la imagen queda registrada en un fichero informático.

Atendiendo a la precisión:

- Métricas: Son cámaras estables y de gran precisión, cuya construcción es expresamente para aplicaciones fotogramétricas.
- Semimétricas: Son cámaras fotográficas amateur con adaptación al uso fotogramétrico.

- No métricas: Son cámaras amateur al igual que las cámaras semimétricas en las cuales es más importante la calidad gráfica que la geométrica.

Las cámaras fotogramétricas multibanda o multispectrales capturan información de diferentes bandas del espectro según diferentes esquemas de diseño:

- Cámara multiente: Tiene distintas lentes con un filtro en cada una, aunque un mismo cuerpo para todas las lentes.
- Multicámara: Tiene tres o más cámaras registrando independientemente bandas diferentes: azul, roja, verde, infrarroja.
- Con prima de partición: Tienen un prisma de partición incorporado entre la lente y el plano focal, separando el haz de luz dependiendo de la longitud de onda.

Coloquialmente las cámaras métricas son aquellas que poseen características especiales, como ciertos parámetros constrictivos que permiten obtener información métrica precisa de las imágenes adquiridas.

Aunque las cámaras métricas suelen ser principalmente aéreas, también existen para fotogrametría terrestre, éstas no tienen distancia focal constante y se deben respetar los valores de la profundidad del campo.

Partes principales de una cámara fotogramétrica: el cono y el magazine.

En el cono se localizan los siguientes elementos:

Diafragma y obturador: sirven para el control de la exposición. La velocidad de obturación en fotogrametría aérea oscila entre 1/100 y 1/1000 segundos, mientras que las aberturas del diafragma se encuentran entre $f/4$ y $f/22$.

Soporte de filtros: permite colocar filtros para obtener efectos especiales en la imagen.

Sistema de lentes del objetivo: el conjunto de lentes que direccionan los rayos luminosos que proceden del espacio objeto al plano focal donde se crea la imagen.

Sistema de registros: permiten imprimir información marginal en cada imagen.

La imagen se forma en el plano focal. En el caso de las cámaras digitales se sustituye la película por una matriz de sensores CCD.

Los parámetros fundamentales de la cámara son:

- Tipo de cámara y tipo de lente: donde figurará el fabricante, lentes utilizadas y modelo.
- Distancia focal: Es la distancia desde el centro óptico del objetivo hasta el plano focal, donde se ubica la placa con material sensible a la luz. Los valores más comunes para las cámaras fotogramétricas aéreas son 88mm, 150mm y 300mm.
- Ángulo de abertura: ángulo que forman los rayos luminosos extremos que entran del espacio objeto al espacio imagen por medio del sistema de lentes. La clasificación en las cámaras fotogramétricas aéreas suele ser: normal, gran angular y super gran angular.

Os diferentes tipos de cámaras fotogramétricas se exponen en la siguiente tabla:

TIPO DE CÁMARA	ÁNGULO DE ABERTURA	DISTANCIA FOCAL	CARACTERÍSTICAS
Ángulo normal	~75°	~300mm	Menor distorsión radial y mayor altura de vuelo.
Gran angular	~88 °	~150mm	Escalas medias y grandes de cartografía
<u>Super</u> angular	gran ~150 °	~88mm	Mayor distorsión radial. Escalas pequeñas.

Tabla Número 3.1.-Parámetros fundamentales de una cámara métrica

En el estudio de una cámara métrica los siguientes elementos son importantes:

- Punto nodal anterior: es el punto de entrada al sistema de lentes de un rayo luminoso entrando perpendicularmente al sistema.
- Punto nodal posterior: es el punto de salida al sistema de lentes de un rayo luminoso entrando perpendicularmente al sistema.
- Punto principal de autocolimación: es el punto sobre el plano focal donde incide un rayo perpendicularmente al sistema.
- Punto principal de simetría: es el punto en el plano focal respecto del que las distorsiones son simétricas.
- Eje óptico: es el eje que contiene los centros de curvatura de una lente.

Las cámaras métricas traen un certificado de calibración en el cual figuran los valores de los parámetros de la cámara. Algunos de éstos parámetros son: coordenadas de las marcas fiduciales, coordenadas del punto principal, coeficientes para correcciones de distorsión, distancia focal calibrada, para cada uno de ellos figura el valor más probable y su precisión.

La calibración debe hacerse de forma periódica ya que los pliegos de prescripciones técnicas no permiten calibraciones con 2 o más años de antigüedad. [11]

4. CLASIFICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA



Figura Número 3.20.-Clasificación de la fotogrametría / Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

- Fotogrametría Terrestre: su aplicación principal se encuentra en la arquitectura, basándose en la toma de fotografías desde la superficie terrestre en la cual se conoce el posicionamiento de la cámara y objeto.
- Fotogrametría Aérea: técnica que, desde plataformas especiales (aviones, drones...) toma fotografías aéreas con una cámara de toma de vistas.
- Fotogrametría analógica: utiliza aparatos de restitución ópticos o mecánicos, donde se realiza la alineación de imágenes para crear un modelo estereoscópico escalado y nivelado. Además, utiliza información planimétrica para la confección de mapas.
- Fotogrametría analítica: se crea el restituidor analítico logrando niveles de detalle a distintas escalas, haciendo posible el vuelco de datos a programas de tipo CAD.
- Fotogrametría digital: el progreso de la fotogrametría hasta la fase digital, ha sido posible gracias a los avances informáticos en la última década del siglo XX. Las imágenes se ingresan en el ordenador y el operador identifica con precisión los puntos homólogos o bien por comparación de imágenes, obteniendo como resultado una imagen en formato vectorial o ráster. Esta salida digital permite ser utilizada como información de base para la generación de Sistemas de Información Geográfica (SIG).[18]

5. FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

5.1. FUNDAMENTOS FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

La fotogrametría digital está basada en la fotogrametría convencional pero aplicada en imágenes digitales.

El avance de la fotogrametría digital ha permitido las siguientes mejoras:

- Evolución en el hardware:
- Necesidad de procesadores de alta velocidad y capacidad de manejo ya que necesita procesar ficheros de gran tamaño.
- Necesidad de tarjetas gráficas de altas prestaciones y monitores de calidad.
- Desarrollo de dispositivos hardware tipo mouse.
- Aparición de escáneres fotográficos.

Evolución en el software:

- Sistemas operativos capaces de manejar todo el hardware necesario.
- Importante evolución en programas de tratamiento y procesado de imágenes.
- Los equipos de fotogrametría digital se denominan estaciones fotogramétricas digitales.

5.2. CONCEPTO IMAGEN DIGITAL

Se define imagen digital en niveles de gris a la matriz bidimensional cuyas celdas cuadradas son llamadas píxeles. Cada pixel tiene asignado un único color estando definido por un número digital. Cuando la imagen es en color, tiene tres matrices

correspondientes a cada color primario y el color de cada pixel queda determinado por la combinación de cada uno de los colores del mismo pixel en cada una de las matrices.

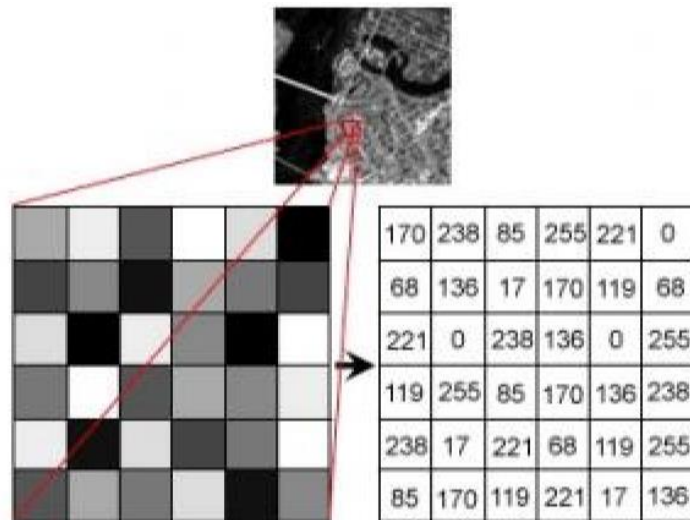


Figura Número 3.21.-Píxel de una imagen/ Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

Para apreciar los píxeles en una imagen se debe ampliar progresivamente hasta ver los “cuadros” (píxeles) como se muestra a continuación.[11]

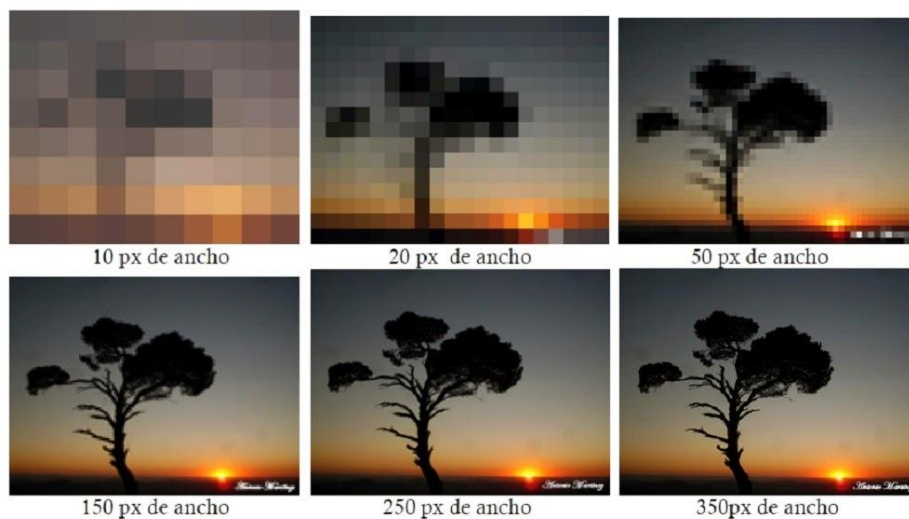


Figura Número 3.22.-Resolución espacial

5.3. RESOLUCIÓN DE IMÁGENES DIGITALES

En las imágenes digitales, la resolución geométrica está relacionada con el tamaño de los píxeles, el cual se expresa en micras. A través de la escala fotográfica se pasa a magnitudes terreno, obteniéndose la resolución espacial. En las imágenes digitales se utiliza el tamaño del píxel a escala del terreno; GSD (Ground Sample Distance).

Se define resolución radiométrica a la sensibilidad del sensor para discretizar las diferencias de la radiación recibida.

Para cualquier tipo de sensor la resolución radiométrica será el número máximo de niveles de gris, siendo más fácil de cuantificar en las imágenes digitales que en las analógicas. En una imagen digital la cantidad de tonos discriminable está relacionado con una potencia de 2. Si la información de cada celda se almacena en un byte, 8 bits (ocho dígitos binarios 0/1), podían manejar un total de 256 valores distintos, rango $[2,255] = 256$. Si la información de cada celda se almacena en 1 bit, únicamente se podrá diferenciar entre blanco o negro. Habrá mayor resolución cuantos más números de posibles valores haya. El tamaño de del archivo crece en relación a la resolución. La resolución espectral de una imagen digital, indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede distinguir un sensor.

5.4. CAPTURA DE IMÁGENES DIGITALES

Existen dos modos de adquirir una imagen fotogramétrica digital:

Por adquisición indirecta mediante la digitalización o escaneado de una imagen analógica mediante un escáner fotogramétrico.

Por adquisición directa en formato digital mediante una cámara fotogramétrica digital.

5.4.1. Sensores de captura de imágenes digitales

Los sensores de captura de imágenes digitales están formados por un sustrato semiconductor formado por silicio, pudiendo transmitir y almacenar carga eléctrica, a este sustrato se le añaden impurezas de dióxido de silicio que actúan como aislante.

Clasificación de los sensores:

- Según la fuente de emisión de energía pueden ser activos; si disponen su propia fuente de emisión y el sistema de captura es únicamente las longitudes de onda en el mismo rango que el sistema emisor o pasivos; si los sensores captan la energía emitida por la superficie.
- Según el formato de salida de la imagen pueden ser analógicos; cuando el elemento fotosensible es una sustancia que reacciona de forma química a la radiación, o digitales; cuando el elemento fotosensible al recibir el impacto de los fotones genera una señal eléctrica.
- Según el número de bandas pueden ser multispectrales; cuando registran por separado valores de radiación en distintas bandas de longitudes de onda o, monoespectrales; cuando para cada pixel se integra toda la energía recibida en un intervalo de onda
- Según el modo de captura pueden ser puntuales; cada instante el sensor registra un único punto. Lineales; cada instante se registra una línea de la imagen. Matriciales; donde para cada instante el sensor registra una imagen completa (utilizado en las cámaras digitales).

5.4.2. La cámara fotogramétrica digital

El principio de una cámara fotogramétrica digital es similar al de una cámara fotogramétrica analógica, pero en el plano focal, en lugar de colocar una película, se dispone sensores CCD en distribución matricial o lineal.[11]



Figura Número 3.23.-Cámara fotogramétrica digital

Estas son las más utilizadas actualmente:

- ADS40 (Leica)
- DIGITAL MAPPING CAMERA DMC (Z/I Imaging)
- ULTRACAM (Vexcel)

5.5. ORIENTACIÓN INTERNA DIGITAL

Se trata de la primera fase del método fotogramétrico, consistiendo en la reconstrucción del haz proyectivo definido por el tipo de sensor y por los puntos de la imagen.

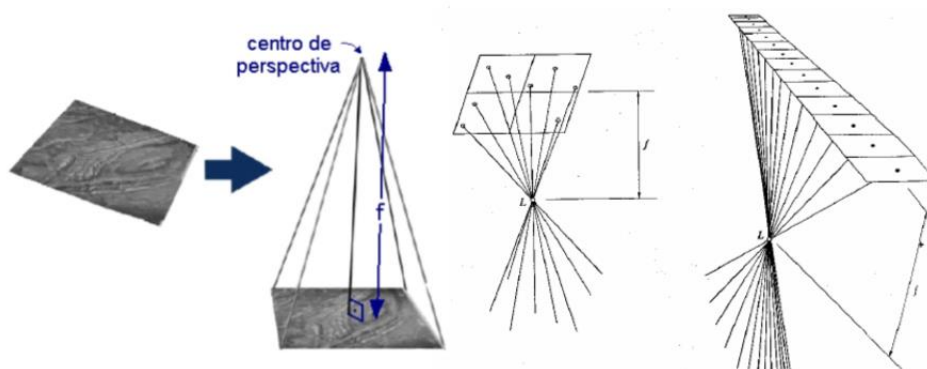


Figura Número 3.24.-Reconstrucción del haz proyectivo de una imagen / Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

Cada uno de los rayos del haz proyectivo están definidos por el punto de la imagen correspondiente al rayo proyectivo y su centro proyectivo.

La definición de la orientación interna en fotogrametría digital se define como el proceso por el cual a partir de las coordenadas píxel de la imagen se puede obtener las coordenadas en mm, a partir de las cuales, se procede con la fase siguiente del método general fotogramétrico.

El concepto de orientación interna en fotogrametría digital cambia dependiendo de la imagen tratada, ya proceda del escaneo de una imagen analógica o adquirida mediante cámara digital.

5.6. ORIENTACIÓN INTERNA DE UNA IMAGEN DE CÁMARA DIGITAL

Si las imágenes se obtienen con cámaras digitales, la información necesaria es similar a la información que aparece en los certificados de calibración como se puede ver en la siguiente figura.

UltraCAM Osprey Prime technical specifications

Panchromatic Camera

Large Format Panchromatic Output Image

Image Format	long track cross track	45.084mm 70.044mm	7514pixel 11674pixel
Image Extent		(-22.54, -35.02)mm	(22.54, 35.02)mm
Pixel Size		6.000μm*6.000μm	
Focal Length mm	ck	82.000	± 0.002mm
Principal Point mm	X_ppa	0.000	± 0.002mm
(Level 2)	Y_ppa	0.000 mm	± 0.002mm
Lens Distortion Remaining Distortion less than 0.002mm			

Tabla Número 3.2.-Certificado de calibración cámara digital/ Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

En la orientación interna la imagen está tratada de forma que:

- Las columnas crecen en la dirección de vuelo, materializando el eje “x” del sistema de coordenadas fiduciales de una imagen analógica.
- Las filas crecen en dirección perpendicular al vuelo, materializando el eje “y” del sistema de coordenadas fiduciales de una imagen analógica.
- El píxel central de la imagen, materializa el centro fiducial en una cámara analógica.
- La distorsión radial de la lente ya ha sido corregida.

La orientación interna se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Introducción de la información del certificado de calibración:

- a) Tamaño de la imagen y número de filas y columnas.
- b) Tamaño del píxel, en μm.
- c) Distancia focal calibrada, en mm.
- d) Posición del PPS respecto al centro de la imagen.

2. Paso de las coordenadas digitales a coordenadas fiduciales. Esto es posible mediante un cambio de escala en los ejes o una translación, siendo su expresión la siguiente:

$$\begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma \frac{ncols}{2} \\ \gamma \frac{rows}{2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} col \\ row \end{pmatrix}$$

Si el pixel no fuese cuadrado habría que considerar dos factores de escalas distintos para las coordenadas fila y columna en función del tamaño en esas direcciones.

3. Paso de coordenadas fiduciales a coordenadas imagen, siguiendo los siguientes pasos:

a) Referir las coordenadas al PPS: Se traslada el origen del sistema de coordenadas del centro fiducial al PPS, restando las coordenadas fiduciales a las coordenadas del PPS referidas al centro fiducial, lo que aplicado a un punto genérico se expresa como:

$$X_{pps} = a_0 + a_1 col + a_{2row} - X_{pps f}$$

$$Y_{pps} = b_0 + b_1 col + b_{2row} - Y_{pps f}$$

b) Calcular la corrección por esfericidad terrestre, la cual introduce un desplazamiento radial sobre la imagen determinado por:

$$\Delta_{ret} = \frac{r_{pps^3 H}}{2f^2 R}$$

Donde H equivale a la altura de vuelo y R el radio terrestre (6370000m.).

El desplazamiento en las coordenadas viene dado por las siguientes fórmulas, las cuales se deben sumar para eliminarlo:

$$\Delta_{xet} = \frac{\Delta_{ret}}{r_{pps}} x_{pps}$$

$$\Delta_{yet} = \frac{\Delta_{ret}}{r_{pps}} y_{pps}$$

c) Calcular la corrección atmosférica: La refracción atmosférica introduce un desplazamiento radial sobre la imagen determinado por la siguiente expresión:

$$\Delta r_a = \left(r_{pps} + \frac{r_{pps^3}}{f^2} \right) \left(\frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410h^2}{(h^2 - 6h + 250)H} \right) 10^{-6}$$

En la que H es la altura de vuelo y h la altura del terreno. El desplazamiento en las coordenadas viene dado por la siguiente expresión, el cual será eliminado restandole:

$$\Delta X_{ra} = \frac{\Delta r_a}{r_{pps}} x_{pps}$$

$$\Delta Y_{ra} = \frac{\Delta r_{ra}}{r_{pps}} y_{pps}$$

d) Aplicar las correcciones obtenidas:

$$x_1 = X_f - X_{pps} - \Delta x_{ra} + \Delta x_{et}$$

$$y_1 = Y_f - Y_{pps} - \Delta x_{ra} + \Delta x_{et}$$

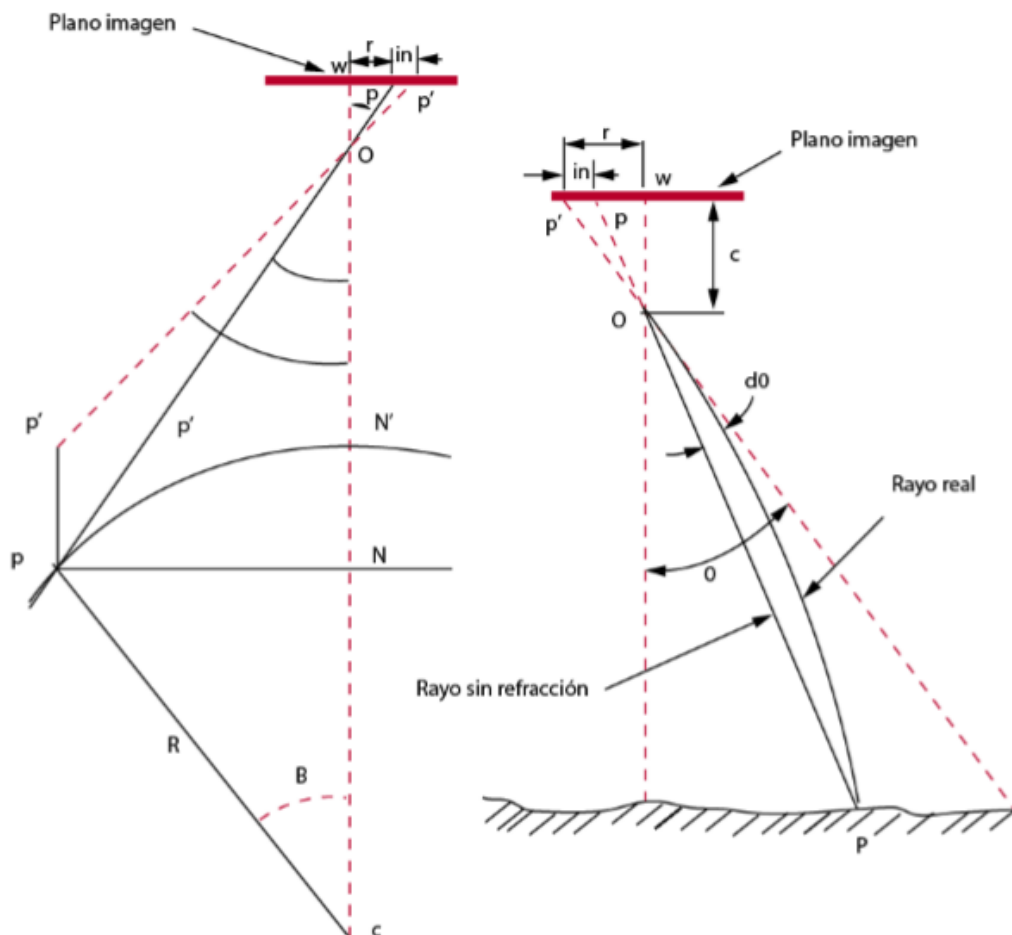


Figura Número 3.25.-Correcciones por esfericidad terrestre y por refracción atmosférica

5.7. CORRELACIÓN DE IMÁGENES

En un punto de un objeto desde el cual se captan diferentes imágenes fotogramétricas, los puntos homólogos son los diferentes puntos sobre las imágenes que son imagen del punto.

En algunas aplicaciones de la fotogrametría digital, es necesario habiendo identificado el punto en una imagen que corresponde a un punto del objeto fotografiado, localizar los demás puntos homólogos en el resto de imágenes.

La manera de identificar los puntos homólogos puede ser de forma manual tanto estereoscópica como monoscópicamente.



Figura Número 3.26.- Identificación de puntos homólogos en dos imágenes

5.7.1 Correlación automática de imágenes

Uno de los avances más importantes dentro de la fotogrametría digital lo constituyen las técnicas de correlación automática de imágenes lo cual implica la automatización de gran parte de procesos fotogramétricos ahorrando una gran cantidad de tiempo al operador, en particular para la obtención inmediata y automática de un modelo digital del terreno.

La correlación automática de imágenes, también llamada (“matching”) se define como la identificación de puntos homólogos en uno y otro fotograma de las imágenes digitales.

El principal problema parte de un conocido área de búsqueda donde aproximadamente se encuentra el homólogo de un punto dado. El área preseleccionada se llama “matriz de búsqueda” y se ha de localizar dentro de la matriz a la “matriz patrón”.

				223	43	223	223
				221	41	223	223
				220	42	43	43
				223	223	223	223

Figura Número 3.27.- Matriz patrón

Para realizar la búsqueda se necesita algún algoritmo que encuentre similitudes de niveles digitales de la matriz patrón en la matriz de búsqueda, éstas no tienen por qué significar igualdades, debido a que de lo contrario no se encontrarían.

5.7.2. Métodos de correlación

En fotogrametría digital suelen utilizarse dos o más algoritmos al tiempo para minimizar los errores en la búsqueda de la imagen homóloga.

Los algoritmos se basan en los siguientes métodos:

- Método de la función de covarianza: la matriz patrón va recorriendo el área de búsqueda calculando la covarianza y se elige como imagen homóloga la que tenga mayor covarianza con la matriz patrón.

Si x_i es el nivel digital (ND) de un píxel i en la matriz patrón e y_i es el ND de un píxel de la matriz de búsqueda, la covarianza viene dada por:

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

- Método del coeficiente de correlación: el coeficiente de correlación entre dos grupos de datos viene dado por la expresión siguiente:

$$c = \frac{\sigma_{xy}}{\sqrt{\sigma_{xx}\sigma_{yy}}}$$

Este valor c se encuentra siempre entre -1 y $+1$. Cuando $c = 1$, la correlación es total, tratándose de la misma imagen. Cuando $c=0$, no existe ninguna correlación entre el patrón y la búsqueda. En el caso de $c = -1$, existe una correlación inversa (por ejemplo en el caso de una imagen y su negativo). Es casi imposible encontrar una correlación total en dos imágenes homólogas, ya que siempre existirá variación, de tal forma que los valores que se encuentren por encima de $0,7$ se consideran aceptables para considerar puntos homólogos.

- Método de los valores absolutos de ND: Este método es muy sencillo ya que consume poca memoria de cálculo y por lo tanto es rápido en la comparación de similitud de dos imágenes. Consiste en restar las diferencias de los ND de un píxel respecto a la media de cada matriz y sumar sus valores absolutos:

$$d = \sum_{i=1}^n |(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})|$$

Se recorre todo el área de búsqueda y se toma la matriz de búsqueda en la que el valor d es el mínimo. Esta sería la matriz que tiene la máxima correlación con respecto a la matriz patrón.

- Método del cuadrado de las diferencias de ND: es el mismo que el anterior pero se toma el cuadrado y se busca cual es el valor mínimo.

$$d = \sum_{i=1}^n |(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})|^2$$

5.7.3. Geometría epipolar

Existen gran cantidad de algoritmos de búsqueda más complejos y con mejores resultados. Muchos algoritmos de correlación utilizan lo que se denominan imágenes “normalizadas” o “epipolares” ya que la búsqueda no se suele hacer en un espacio bidimensional sino en un espacio unidimensional.

Siendo así la complejidad de los algoritmos es menor, reduciendo así el tiempo de cálculo.

Se basa en que, idealmente, los puntos de vista O_1 y O_2 de dos imágenes, los puntos homólogos y el punto de la realidad se encuentran sobre el mismo plano (epipolar), entonces la imagen homóloga de un punto se encuentra sobre la recta epipolar e'' siendo la intersección de este plano con el plano de la fotografía.

Dado que en realidad no existen los planos epipolares (los ejes de toma no son paralelos ni perpendiculares a la base aérea) es necesaria una previa transformación de las imágenes a imágenes normalizadas en las que esto sí se cumple. [19]

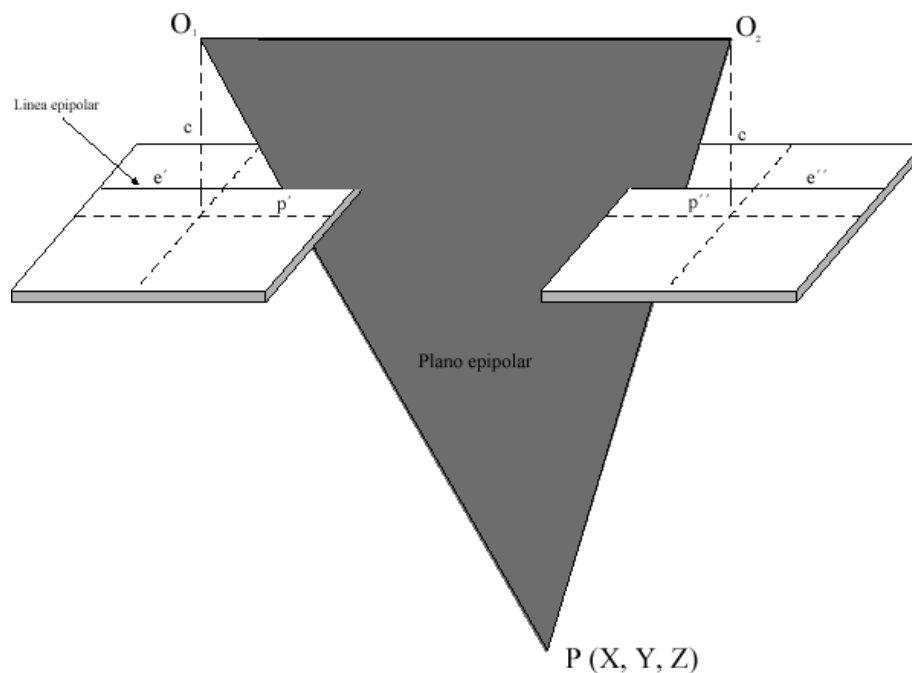


Figura Número 3.28.-Línea epipolar

5.8. ORIENTACIÓN EXTERNA

Su objetivo consiste en la obtención de los parámetros que permiten el correcto posicionamiento del haz de rayos de la imagen, respecto a un sistema de referencia vinculado al terreno.

Según la figura mostrada continuación, existen dos sistemas de referencia:

- 1) El sistema de referencia de la imagen (x,y,z) , definido mediante orientación interna, donde el origen es el punto principal de simetría (PPS), el plano de la imagen es el plano $z=0$ el eje z coincide con el eje teórico óptico y la coordenada z de todos los puntos es la distancia focal cambiada de signo y el sistema de ejes (x, y) sigue las direcciones del sistema de coordenadas fiducial.
- 2) El sistema de referencia vinculado al terreno. Generalmente un sistema geodésico para empleo de cartografía con carácter oficial.

La relación entre ambos sistemas de coordenadas no es más que una translación y un cambio de base, o tres reotaciones al ser bases de sistemas ortonormales, considerando la misma escala en ambos sistemas. [11][20]

Para establecer esta relación se deben determinar los siguientes parámetros:

- Las coordenadas del centro de proyección de la imagen en el sistema de coordenadas terreno, (ECP, YCP, ZCP).
- Las siguientes rotaciones:
 - Rotación en torno al eje x, ω .

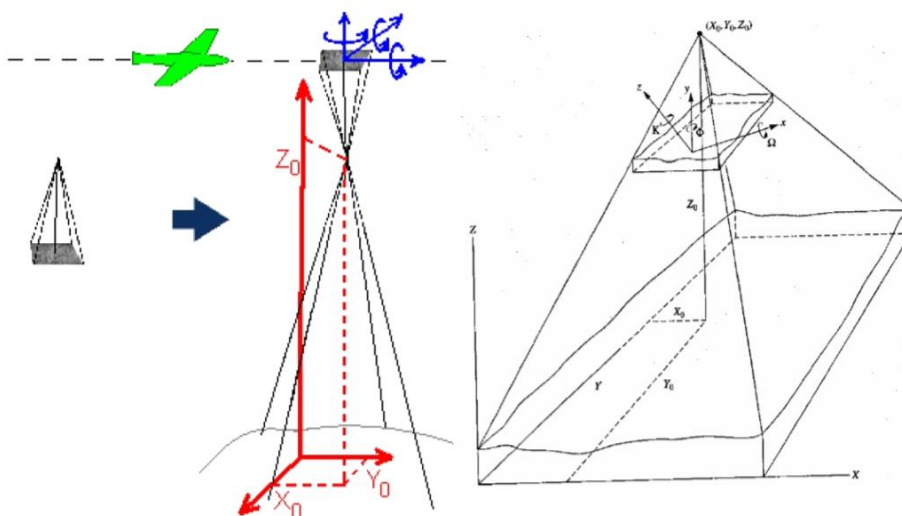


Figura Número 3.29.-Orientación externa de una imagen/ Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

- Rotación en torno al eje y, ϕ .
- Rotación en torno al eje x, k .

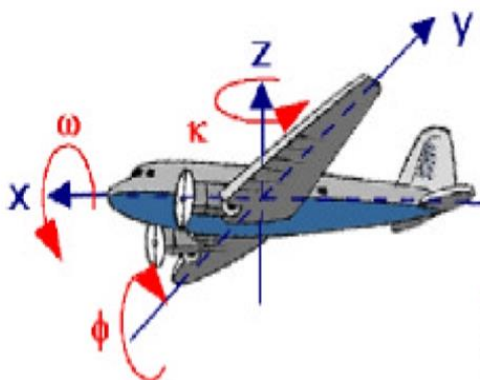


Figura Número 3.30.-Giros del sistema de coordenadas imagen/ Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

5.8.1. Puntos de apoyo

La fase en la que se obtienen las coordenadas del conjunto de puntos de las imágenes se llama apoyo fotogramétrico. Los puntos de apoyo son la referencia de todo el proceso, de esta forma las coordenadas se deben obtener en el sistema de referencia geodésico al que se debe de referir el trabajo.

La configuración del apoyo fotogramétrico viene dada por el número y distribución de los puntos de apoyo. Clasificándose en los siguientes tipos:

- Apoyo continuo.

Es un método tradicional, el apoyo se realiza independientemente de los pares fotogramétricos, tomándose un mínimo de cinco puntos de apoyo, localizados en los cuatro extremos en el entorno de las zonas de los puntos de Von Grüber y el último en el centro del modelo.

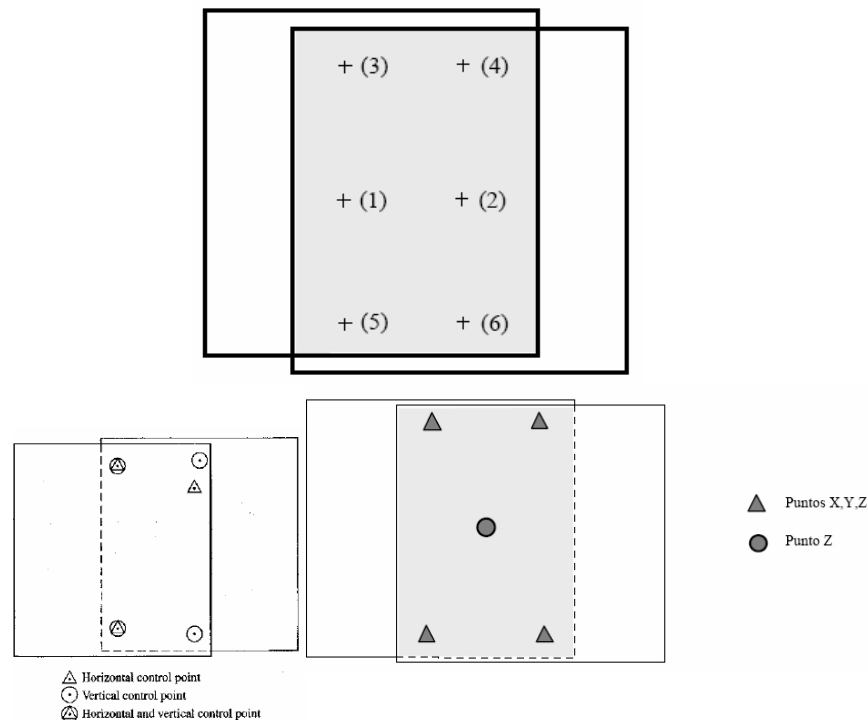


Figura Número 3.31.-Distribución de los puntos en apoyo continuo. / Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

- Apoyo para aerotriangulación.

La aerotriangulación permite reducir el número de puntos de apoyo, orientando mediante un bloque fotogramétrico integrado por una o varias pasadas.

Una configuración clásica de apoyo de campo suele exigir que se apoyen los modelos extremos de cada pasada y que se apoye un modelo cada 3 o 4 de la pasada o incluso se incluyan únicamente un par de puntos cada 3 o 4 modelos.

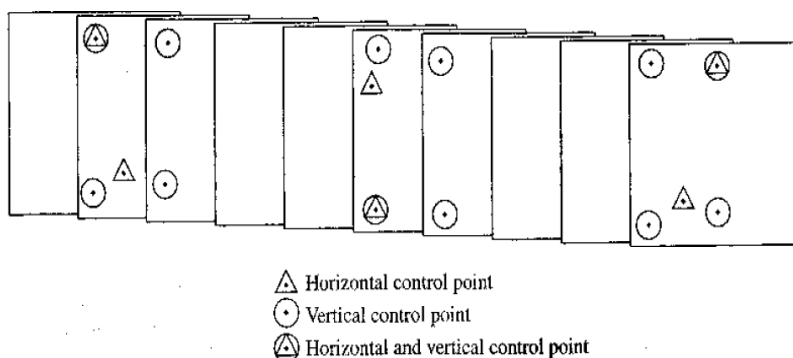


Figura Número 3.32.-Apoyo aerotriangulación / Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

Para medir los puntos de apoyo es necesario asegurarse de su correcta localización en campo, para luego visualizarlo correctamente en las imágenes, ya que puede verse perfectamente en una imagen y en otra de ellas tener elementos que impidan su visualización.

Actualmente en las reseñas de los puntos de apoyo se da información del tipo: identificador, coordenadas, imagen con la posición aproximada, posición sobre la cartografía, etc.[11]

5.8.2. Ecuaciones de colinealidad

La condición de colinealidad expresa que el punto del terreno, la imagen y el centro de proyección, deben de estar alineados y pertenecer a una misma recta.

En fotogrametría la condición de colinealidad permite lo siguiente:

- Determinar la orientación externa de la imagen, mediante las coordenadas de la imagen y el terreno de un conjunto de puntos de control. Esta operación se denomina resección espacial.
- Determinar las coordenadas del terreno de cualquier punto que pertenezca a la zona de recubrimiento de dos imágenes, según los parámetros de orientación y las coordenadas de la imagen habiendo resuelto sus orientaciones previamente. Esta operación se denomina intersección espacial, consistiendo en solucionar la intersección de dos rectas en R^3 .

Dado un punto arbitrario P, de coordenadas del terreno $\bar{X}=(X, Y, Z)$ y de coordenadas de la imagen $\bar{x}=(x, y, z)$ la recta que pasa por el centro de proyección, punto $\bar{X}_{CP}=(X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP})$, y por el punto de la imagen se expresa como:

$$\bar{X} = \bar{X}_{CP} + \lambda R \bar{x}$$

matricialmente se expresa como,

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

La matriz R es la matriz de cambio de base para pasar del sistema de referencia de la imagen al del terreno. Para deducir la matriz R, son necesarias tres matrices de rotación:

- Rotación en torno al eje z, ángulo positivo k

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = Rk \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos k & \sin k & 0 \\ -\sin k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

- Rotación en torno al eje y, ángulo positivo ϕ

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = R\phi \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$$

- Rotación en torno al eje x, ángulo positivo ω

$$\begin{pmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{pmatrix} = R\omega \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix}$$

Sumando las tres rotaciones obtenemos la matriz $R=R\omega R\phi Rk$ o lo que es lo mismo

$$R = \begin{pmatrix} \cos\phi \cos k & -\cos\phi \sin k & \sin\phi \\ \cos\omega \sin k + \sin\omega \sin\phi \cos k & \cos\omega \cos k - \sin\omega \sin\phi \sin k & -\sin\omega \cos\phi \\ \sin\omega \sin k - \cos\omega \sin\phi \cos k & \sin\omega \cos k + \cos\omega \sin\phi \sin k & \cos\omega \cos\phi \end{pmatrix}$$

Para obtener las ecuaciones de colinealidad es necesario despejar la ecuación

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Obteniendo

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{\lambda} R^{-1} \begin{pmatrix} X - X_{cp} \\ Y - Y_{cp} \\ Z - Z_{cp} \end{pmatrix}$$

Las matrices de rotaciones individuales son matrices ortogonales por lo tanto su inversa coincide con la traspuesta, $M = R^{-1} = R^T$, obteniéndose:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_{cp} \\ Y - Y_{cp} \\ Z - Z_{cp} \end{pmatrix}$$

Al desarrollar la expresión anterior en sus tres filas e introduciendo como coordenada z la distancia focal calibrada f, se obtiene:

$$x = \frac{1}{\lambda} (m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0))$$

$$y = \frac{1}{\lambda} (m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0))$$

$$f = \frac{1}{\lambda} (m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0))$$

Después se dividen las dos primeras expresiones anteriores por la tercera, deduciéndose así las ecuaciones de colinealidad de la fotogrametría:

$$x = -f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = -f \frac{r}{q}$$

$$y = -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = -f \frac{s}{q}$$

siendo

$$r = m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)$$

$$s = m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)$$

$$q = m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)$$

Por lo tanto en las ecuaciones de colinealidad intervienen:

- Coordenadas de la imagen (x, y, -f)
- Coordenadas del terreno (X, Y, Z)
- Coordenadas del terreno del centro de proyección (X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp})
- Orientación del eje de toma respecto al sistema de coordenadas terreno definida por las rotaciones (ω, φ, k). [11]

5.8.3. Resección espacial

La resección espacial permite determinar los parámetros de orientación externa de una imagen con las ecuaciones de colinealidad.

Para ello son necesarios los datos siguientes:

- Focal de la cámara f.
- Coordenadas terreno de un conjunto de puntos de control (X_i, Y_i, Z_i) con $i \in \{1, 2, \dots, np\}$
- Coordenadas imagen de los puntos de control (x_i, y_i) con $i \in \{1, 2, \dots, np\}$

Así como la estimación de la precisión de las coordenadas imagen, que puede proceder de la solución de la orientación externa.

Las ecuaciones de colinealidad, permiten definir dos funciones: g (coordenada x) y h (coordenada y):

$$x = f \frac{r}{q} \equiv x = g(\omega, \phi, k, X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp})$$

$$y = f \frac{s}{q} \equiv y = h(\omega, \phi, k, X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp})$$

de las cuales se plantea la solución a la determinación de los parámetros de orientación externa.

$$F(\vec{x}): \Omega \subset \mathbb{R}^6 \rightarrow \mathbb{R}^2$$

Autora: Cristina Diego Soroa

$$\vec{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = (\omega, \phi, k, X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp})$$

$$F(\vec{x}) = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = F(\omega, \phi, k, X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp})$$

$$F(\vec{x}) = (g(\vec{x}), h(\vec{x}))$$

El resultado es una función en la que las funciones coordenadas se corresponden con las funciones anteriores (g y h).

El objetivo de la resección espacial es determinar el vector de parámetros \vec{x} . Supuesto conocido un valor aproximado para cada uno de los parámetros de orientación externa

$$\vec{x}_0 = (F(\omega_0, \phi_0, k_0, X_{cp0}, Y_{cp0}, Z_{cp0}))$$

Se plantea la siguiente ecuación:

$$\vec{x} = \vec{x}_0 + d\vec{x}$$

en la que el vector desplazamiento a los parámetros es:

$$d\vec{x} = (d\omega, d\phi, dk, dX_{cp}, dY_{cp}, dZ_{cp})$$

Representando las correcciones que permiten llegar al valor correcto en lugar del valor aproximado.

Operando las expresiones de colinealidad:

$$x = -f \frac{m_{11}(X-X_0) + m_{12}(Y-Y_0) + m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} = -f \frac{r}{q}$$

$$y = -f \frac{m_{21}(X-X_0) + m_{22}(Y-Y_0) + m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} = -f \frac{s}{q}$$

Se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial g}{\partial w} & \frac{\partial g}{\partial \phi} & \frac{\partial g}{\partial k} & \frac{\partial g}{\partial X_{cp}} & \frac{\partial g}{\partial Y_{cp}} & \frac{\partial g}{\partial Z_{cp}} \\ \frac{\partial h}{\partial w} & \frac{\partial h}{\partial \phi} & \frac{\partial h}{\partial k} & \frac{\partial h}{\partial X_{cp}} & \frac{\partial h}{\partial Y_{cp}} & \frac{\partial h}{\partial Z_{cp}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dw \\ d\phi \\ dk \\ dX_{cp} \\ dY_{cp} \\ dZ_{cp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + f \frac{r_0}{q_0} \\ y + f \frac{s_0}{q_0} \end{pmatrix}$$

De la cual si tenemos n puntos resultaría:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial g_0}{\partial w} & \frac{\partial g_0}{\partial \phi} & \frac{\partial g_0}{\partial k} & \frac{\partial g_0}{\partial X_{cp}} & \frac{\partial g_0}{\partial Y_{cp}} & \frac{\partial g_0}{\partial Z_{cp}} \\ \frac{\partial h_0}{\partial w} & \frac{\partial h_0}{\partial \phi} & \frac{\partial h_0}{\partial k} & \frac{\partial h_0}{\partial X_{cp}} & \frac{\partial h_0}{\partial Y_{cp}} & \frac{\partial h_0}{\partial Z_{cp}} \\ \frac{\partial g_1}{\partial w} & \frac{\partial g_1}{\partial \phi} & \frac{\partial g_1}{\partial k} & \frac{\partial g_1}{\partial X_{cp}} & \frac{\partial g_1}{\partial Y_{cp}} & \frac{\partial g_1}{\partial Z_{cp}} \\ \frac{\partial h_1}{\partial w} & \frac{\partial h_1}{\partial \phi} & \frac{\partial h_1}{\partial k} & \frac{\partial h_1}{\partial X_{cp}} & \frac{\partial h_1}{\partial Y_{cp}} & \frac{\partial h_1}{\partial Z_{cp}} \\ \frac{\partial g_n}{\partial w} & \frac{\partial g_n}{\partial \phi} & \frac{\partial g_n}{\partial k} & \frac{\partial g_n}{\partial X_{cp}} & \frac{\partial g_n}{\partial Y_{cp}} & \frac{\partial g_n}{\partial Z_{cp}} \\ \frac{\partial h_n}{\partial w} & \frac{\partial h_n}{\partial \phi} & \frac{\partial h_n}{\partial k} & \frac{\partial h_n}{\partial X_{cp}} & \frac{\partial h_n}{\partial Y_{cp}} & \frac{\partial h_n}{\partial Z_{cp}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dw \\ d\phi \\ dk \\ dX_{cp} \\ dY_{cp} \\ dZ_{cp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 + f \frac{r_0}{q_0} \\ y_0 + f \frac{s_0}{q_0} \\ x_1 + f \frac{r_0}{q_0} \\ y_1 + f \frac{s_0}{q_0} \\ x_n + f \frac{r_0}{q_0} \\ y_n + f \frac{s_0}{q_0} \end{pmatrix}$$

Para resolverlo es necesario disponer de unos valores aproximados para las rotaciones y las coordenadas del centro de la proyección, cumpliéndose que el desarrollo en serie de Taylor incluya únicamente la diferencial.

En fotogrametría aérea los valores aproximados se obtienen a partir de los resultados del sistema GPS/INS, o sino se dispone del sistema se estiman en:

Rotación en torno al eje x, ω_0 . Se aproxima a 0.

Rotación en torno al eje y, ϕ_0 . Se aproxima a 0.

Rotación en torno al eje z, k_0 . Se estima como la diferencia entre el azimut en coordenadas terreno y el azimut en coordenadas imagen para la línea definida por los puntos más alejados.

De esta forma los puntos i, j son los más alejados, la estimación del valor aproximado de k se calcularía según:

$$K_0 = (\theta_i^j)^T - (\theta_i^j) I$$

Coordenadas aproximadas del centro de proyección (X_{cp0} , Y_{cp0} , Z_{cp0}) se obtienen de la siguiente expresión:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

En fotogrametría terrestre habría que introducir las modificaciones convenientes. La orientación externa de una imagen a partir de la resección espacial se podría resolver en teoría con un mínimo de tres puntos de apoyo al formarse un sistema de seis ecuaciones con seis incógnitas. Sin embargo, con la intención de disponer de información de la calidad de la orientación se acostumbra a exigir una configuración de apoyo que incluya cinco puntos de apoyo.

[11]

5.8.4. Autocalibración

Según la descripción de la resección espacial, realizada en el apartado anterior, se considera que es conocida la distancia focal conocida está calibrada y que las coordenadas imagen están referidas al punto principal de simetría. Esta situación se corresponde a cuando se dispone de la información necesaria del certificado de calibración de la cámara. Sin embargo, hay casos en los que no disponemos de esa información, por ejemplo, en una toma terrestre con una cámara no métrica.

La autocalibración es una variación de la resección espacial en la que incluimos como incógnitas parámetros de la orientación interna, así podemos abordar simultáneamente parte de la solución de la orientación interna y externa.

En uno de los casos más frecuentes, se incluyen como incógnita la corrección a la distancia focal aproximada y las coordenadas del punto principal de simetría.

Transforma las siguientes expresiones:

$$x = f \frac{r}{q} \equiv x = g(\omega, \phi, k, X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp})$$

$$y = f \frac{s}{q} \equiv y = h(\omega, \phi, k, X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp})$$

en:

$$x_1 = x_f - x_{pps_f} = -(f_0 + df) \frac{r}{q} \Rightarrow x_f = x_{pps_f} - (f_0 + df) \frac{r}{q}$$

$$y_1 = y_f - y_{pps_f} = -(f_0 + df) \frac{s}{q} \Rightarrow y_f = y_{pps_f} - (f_0 + df) \frac{s}{q}$$

Expresando las coordenadas fiduciales como función de 9 parámetros:

$$x_f = (x_{pps_f}, y_{pps_f}, f_0, \omega, \phi, k, X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp})$$

$$y_f = h(x_{pps_f}, y_{pps_f}, f_0, \omega, \phi, k, X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp})$$

Estas expresiones son válidas para imágenes digitales de cámaras convencionales, sustituyendo las coordenadas fiduciales por las digitales.[11]

5.8.5. Intersección espacial

La intersección espacial es un método que permite determinar las coordenadas terreno de un punto de un par estereoscópico a partir de dos imágenes, una vez se haya reuelto la orientación externa.

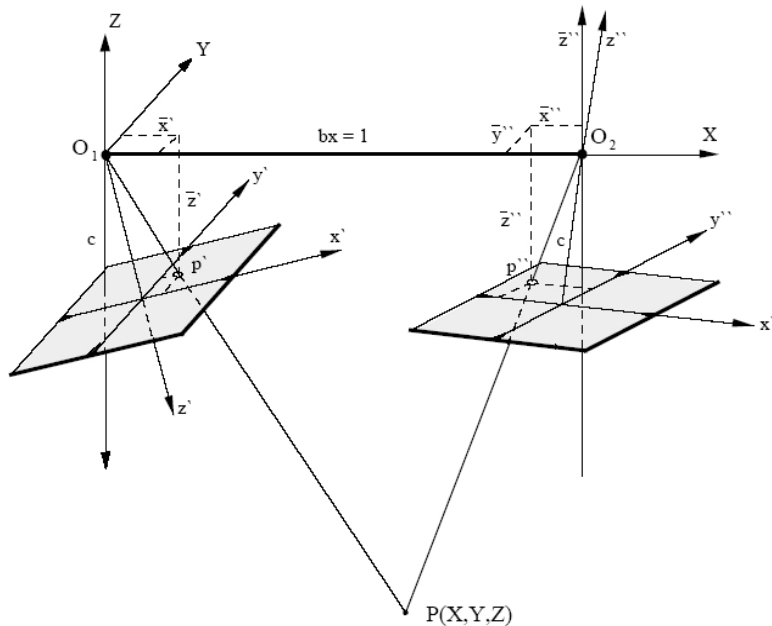


Figura Número 3.33.- Concepto de Intersección espacial

La expresión siguiente, relaciona las coordenadas de la imagen con las coordenadas del terreno.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ f \end{pmatrix}$$

A partir de las cuales se obtienen las tres ecuaciones mostradas a continuación:

$$X - X_{CP} = \lambda (r_{11}x + r_{12}y + r_{13}f)$$

$$Y - Y_{CP} = \lambda (r_{21}x + r_{22}y + r_{23}f)$$

$$Z - Z_{CP} = \lambda (r_{31}x + r_{32}y + r_{33}f)$$

Dividiendo las dos primeras ecuaciones por la tercera se obtiene lo siguiente:

$$X = X_{CP} + (Z - Z_{CP}) \left(\frac{r_{11}x + r_{12}y + r_{13}f}{r_{31}x + r_{32}y + r_{33}f} \right)$$

$$Y = Y_{CP} + (Z - Z_{CP}) \left(\frac{r_{21}x + r_{22}y + r_{23}f}{r_{31}x + r_{32}y + r_{33}f} \right)$$

Desarrollándose así:

$$a = r_{11}x + r_{12}y + r_{13}f$$

$$b = r_{21}x + r_{22}y + r_{23}f$$

$$c = r_{31}x + r_{32}y + r_{33}f$$

$$cX + 0Y - aZ = cX_{CP} - aZ_{CP}$$

$$0X + cY - bZ = cY_{CP} - bZ_{CP}$$

Las imágenes con orientación externa resuelta, en las cuales se conocen las coordenadas imagen de un punto, se generarían dos ecuaciones con tres incógnitas, las coordenadas del terreno del punto. De esta forma si se conociesen las coordenadas en dos imágenes orientadas, daría lugar a un sistema de cuatro ecuaciones con tres incógnitas, resolviéndose por mínimos cuadrados.

$$\begin{pmatrix} c_1 & 0 & -a_1 \\ 0 & c_1 & -b_1 \\ c_2 & 0 & -a_2 \\ 0 & c_2 & -b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 X_{CP1} & - & a_1 Z_{CP1} \\ c_1 Y_{CP1} & - & b_1 Z_{CP1} \\ c_2 X_{CP2} & - & a_2 Z_{CP2} \\ c_2 Y_{CP2} & - & b_2 Z_{CP2} \end{pmatrix}$$

5.8.6. CPS/INS aerotransportado

La integración del GPS en la captura de imágenes en el vuelo, así como el Sistema de Navegación Inercial INS, han permitido avances muy importantes en la determinación de la orientación externa así como en el control del vuelo.

El GPS, registra mediciones sobre satélites en el momento de las tomas fotográficas. Alcanza una precisión del orden métrico, sin embargo, el trabajo en gabinete, procesando conjuntamente la información GPS del avión junto a la información de referencia en una zona próxima, se alcanzan precisiones mejores que el decímetro. Al primero de los posicionamientos se le conoce como absoluto y al segundo como relativo. El resultado del GPS son las coordenadas del centro de proyección para cada una de las tomas.

El INS, está integrado por una Unidad de Medición Universal (IMU). Consta de tres giróscopos y tres acelerómetros, así como el software que determina las aceleraciones y orientaciones con respecto a un sistema de tres ejes que se relaciona con el sistema de coordenadas imagen de la cámara.

El uso combinado de estos sistemas (GPS/INS) permite obtener seis parámetros de orientación externa para cada toma, las coordenadas del centro de proyección y las tres orientaciones de los ejes del sistema de coordenadas imagen.

5.8.7. Rectificación de imágenes

La rectificación de una imagen es un proceso que permite obtener una imagen como si se hubiese obtenido cuando el plano de la imagen es paralelo al principal en el momento de la toma. Las imágenes aéreas, se transforman para obtener la situación ideal como se muestra en la siguiente figura:

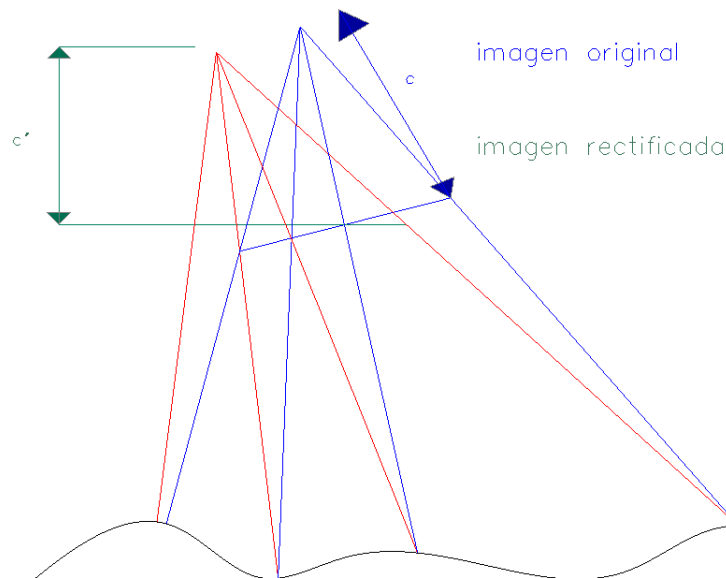


Figura Número 3.34.- Rectificación de una imagen aérea

Los métodos de rectificación, transforma las imágenes mediante coordenadas de la imagen sobre la imagen original, y la imagen rectificada de un conjunto de puntos, dependiendo estos del número de incógnitas asociadas.

Una vez identificado el conjunto de puntos de la imagen rectificada, se miden las coordenadas en la imagen original, y las coordenadas de la imagen rectificada se suponen conocidas de acuerdo a las características de la imagen rectificada.

Éstos son los métodos de transformación más utilizados en rectificación:

- Transformación afín: es una transformación similar al paso de coordenadas digitales a coordenadas fiduciales, solo que en este caso las coordenadas digitales son las coordenadas origen, las digitales de la imagen original (col_o , row_o) y las coordenadas de la imagen rectificada (col_r , row_r). Esta transformación se expresa según:

$$col_r = a_0 + a_1 col_o + a_2 row_o$$

$$row_o = b_0 + b_1 col_o + b_2 row_o$$

- Transformación proyectiva: en esta transformación las expresiones para pasar de un sistema a otro son las siguientes:

$$x' = \frac{c11x + c12y + c13}{c31x + c32y + 1}$$

$$y' = \frac{c21x + c22y + c23}{c31x + c32y + 1}$$

Esta función tiene ocho incógnitas, (c11, c12, c13, c21, c22, c23, c31, c32), lo que significa que la solución exige un mínimo de cuatro puntos. El problema de este método es que no es lineal en las incógnitas, por ello se debe resolver mediante un proceso de linealización para resolver la resección espacial.[11]

5.8.8. Remuestreo de imágenes

Los métodos de remuestreo son técnicas para estimar los niveles digitales a asignar a los píxeles de una imagen transformada.

Éstos métodos exigen disponer de la transformación en el sentido inverso. Se van recorriendo los píxeles de la imagen final, averiguando las coordenadas sobre la imagen inicial cuya transformación da las coordenadas del píxel en cuestión, y aplicando el método de remuestreo.

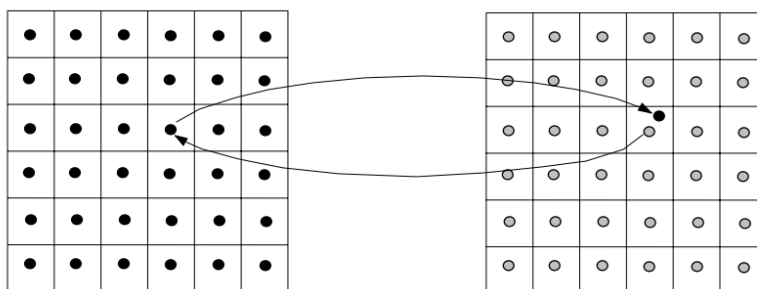


Figura Número 3.35.-Remuestreo de imágenes

Los métodos de remuestreo más habituales son:

- Método del vecino o píxel más cercano

Trata de situar en cada cuadro de la malla de la ortofoto el valor de gris del píxel más cercano en la imagen original. Esta es la solución más rápida teniendo como inconveniente la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen.

- Método de interpolación bilineal

El método de interpolación bilineal promedia los niveles de gris de los cuatro píxeles más próximos de la imagen original. El promedio se pondera en función de la distancia del píxel original al corregido, siendo más influyentes los píxeles más cercanos de la imagen original.

El método de interpolación bilineal es relativamente rápido y presenta mayor precisión geométrica que el del vecino más próximo, por lo que es el más utilizado en fotogrametría.

- Método de interpolación bicúbica

Este método considera los niveles de gris de los 16 píxeles más próximos. Presenta un efecto visual más correcto que los métodos citados anteriormente, aunque supone un volumen de cálculo mucho mayor. [21]

5.8.9. Normalización de imágenes

Este proceso de normalización se aplica a las dos imágenes de un par fotogramétrico, para transformarlas a la situación ideal de la toma fotogramétrica, en la cual dos imágenes de un par son verticales y su eje x materializa el eje de vuelo. Cuando las imágenes hayan sido normalizadas las líneas epipolares deberán ser paralelas al eje x.[11]

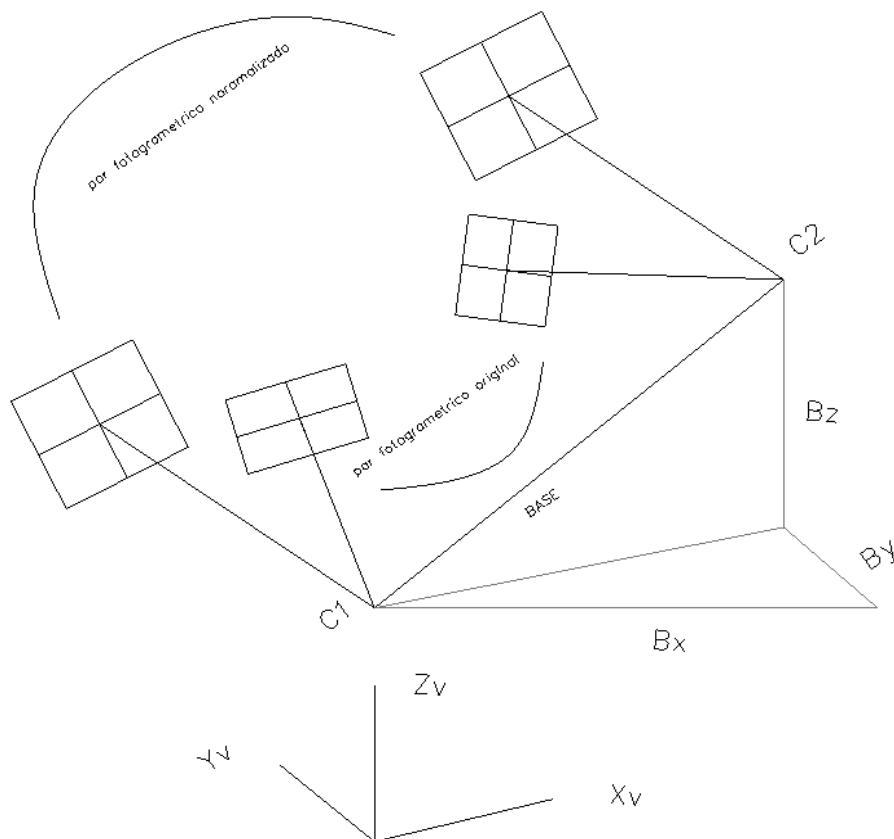


Figura Número 3.36.-Normalización de una imagen

5.9. ORTOFOTOGRAMETRÍA DIGITAL

5.9.1. Concepto de ortorectificación

A diferencia de las imágenes adquiridas con una cámara convencional, una ortoimagen representa una imagen en perspectiva ortogonal.

La obtención de información métrica de una imagen en perspectiva central, tiene dificultades debido a los principios geométricos inherentes a la perspectiva cónica y al problema de ocultamiento de parte del objeto.

A continuación se pueden observar los dos problemas citados anteriormente.

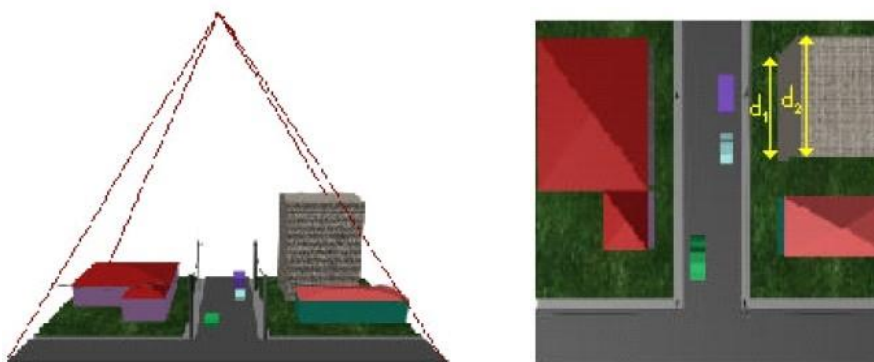


Figura Número 3.37.-Imagen en perspectiva cónica/ Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

- La escala puede variar según la distancia del objeto al centro de la perspectiva, manifestándose en el ancho del edificio siendo este de diferente tamaño que la línea de la fachada o al nivel de la azotea.
- El edificio de la derecha genera una sombra impidiendo que parte del objeto sea registrado en la imagen.

En el caso de una toma que no se ajuste al caso ideal de fotogrametría aérea, eje de toma vertical, los problemas se magnifican.

En una perspectiva ortogonal, los problemas de la perspectiva cónica desaparecen, resultando evidente que la escala es constante para toda la imagen y que no existe el ocultamiento debido a la perspectiva cónica.

Una imagen en proyección ortogonal se puede decir que es una representación a la escala del territorio.

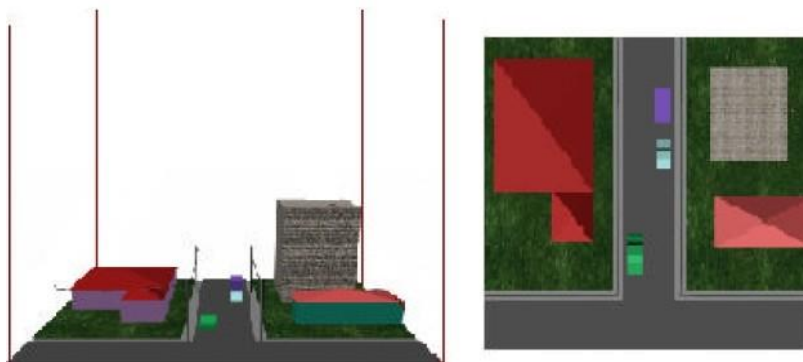


Figura Número 3.38.-Imagen en perspectiva ortogonal/ Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

Para la obtención de ortoimágenes, a partir de una imagen, en perspectiva cónica, se lleva a cabo una transformación, denominada ortorectificación. La ortorectificación se puede considerar un caso más de rectificación, pero dada su importancia dentro de la fotogrametría se ha preferido tratar de forma independiente.

Se define ortorectificación como la evolución de la rectificación, ya que además de resolver el problema de las distorsiones debidas a la captura con el eje de toma no ortogonal al plano principal del objeto, resuelve el problema del cambio de escala en función del relieve, debido a la perspectiva cónica.[11]

5.9.2. Métodos de ortorectificación digital

Una vez conocidas las orientaciones externa e interna de una imagen y disponiendo de un MDT se puede aplicar la ortorectificación.

Al tener la orientación externa se conoce el área definida por el perímetro en coordenadas del terreno de la imagen, además, sabiendo la huella del pixel en el terreno, se puede determinar la matriz de píxeles que corresponderá al área cubierta por la imagen, definiendo así el formato de la ortoimagen, teniendo cada uno de los píxeles unas coordenadas asociadas.

Para la realización del proceso, se recorren los píxeles de la ortoimagen siguiendo los siguientes pasos:

- Determinar las coordenadas del terreno del píxel en cuestión, (E, Y).
- Con las coordenadas planimétricas interpolar sobre el MDE y obtener la altitud del punto, de manera que será conocida su posición espacial, (E, Y, Z).
- Con las coordenadas terreno y los parámetros de orientación externa de la imagen, obtener las coordenadas imagen, (x, y) a partir de las ecuaciones de colinealidad.
- Obtención de las coordenadas digitales a partir de invertir las operaciones de la orientación interna.
- Puesto que las coordenadas digitales no se corresponden con las de un píxel de la imagen se debe proceder a obtener la información de la imagen, nivel de gris o RGB, aplicando alguna técnica de remuestreo: vecino más próximo, interpolación bilineal, etc.

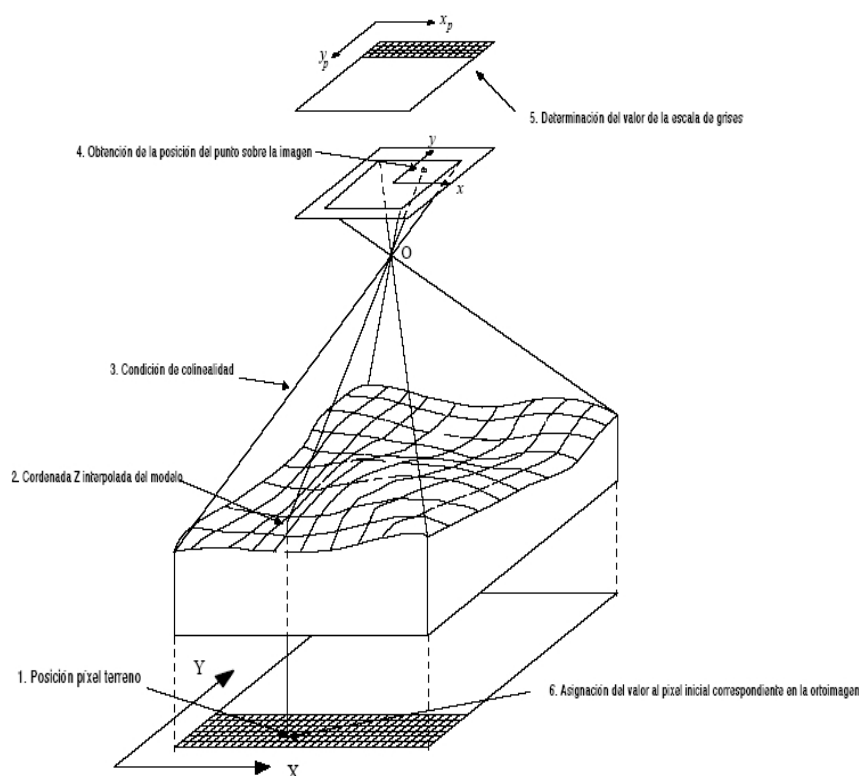


Figura Número 3.39.-Principio metodológico de la rectificación digital/ Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

La ortorectificación se complica debido a la no coincidencia de la superficie real con el MDT, como por ejemplo con la presencia de edificios.

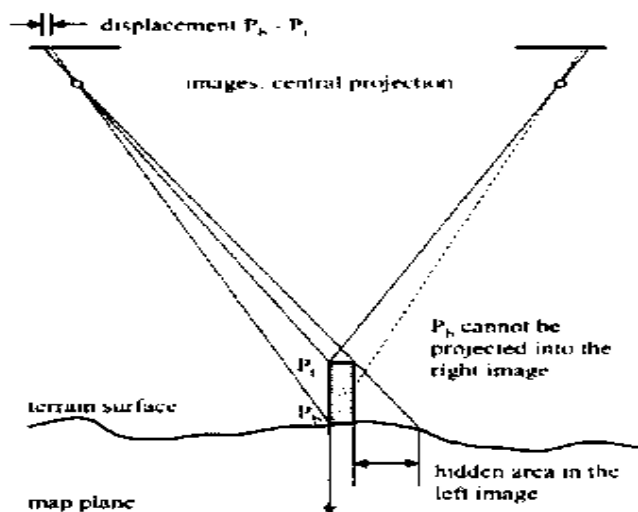


Figura Número 3.40.-Problema debido a la presencia de edificios en la ortorectificación/ Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

Cuando solo se dispone del MDT, la ortorectificación es errónea como se muestra en la siguiente imagen.

- Las zonas donde la imagen coincide con el MDE quedarán bien ortorectificadas, zonas entre A y B, y entre D' y E
- La imagen del edificio sobre la ortoimagen cubrirá la zona entre los puntos B y C', proyección de la fachada, y entre C' y D', proyección del tejado.

Si no se pudiera plantear disponer de más información altimétrica que el MDE, mejorar los resultados pasaría por:

- Aumentar la focal, lo que por otra parte disminuiría la precisión altimétrica.
- Utilizar únicamente zonas de las imágenes muy próximas a la parte central de la imagen, lo que obligaría a tener grandes recubrimientos longitudinales (de hasta del 80 %) con el consiguiente incremento de coste del proyecto.

Para la solución de este problema es necesario disponer del MDT y la cartografía que complete la definición altimétrica.[11]

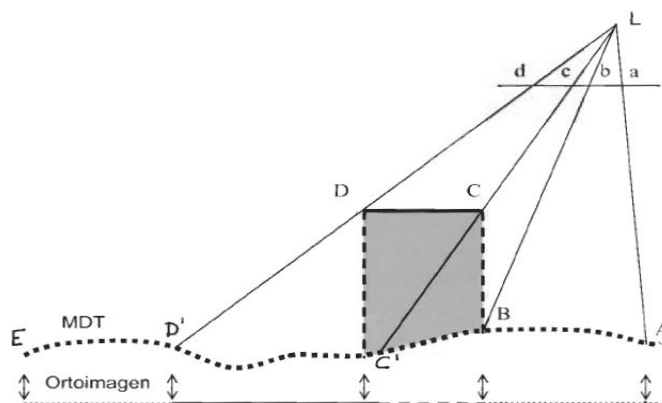


Figura Número 3.41.-Ortoimagen a partir de MDE/ Fuente (Introducción fotogrametría digital David Hernández López)

6. TOMA DE DATOS CON DRON

6.1. INTRODUCCIÓN

El vuelo se realiza con un Dron marca Yuneec modelo H520, es un hexacoptero formado por seis rotores que permiten mantenerlo estable en el aire, además está diseñado para poder funcionar incluso si uno de los rotores fallase.



Figura Número 3.42.-Aeronave H520

Aunque en este trabajo fin de grado sólo ha sido necesario una cámara, el dron posee dos cámaras distintas:

- La CGO-ET es la primera cámara del H520. Posee una cualidad muy importante ya que tiene un sensor térmico, por lo que puede captar cambios de temperatura y luz. Resulta de mucha ayuda a la hora de encontrar personas desaparecidas o que hayan sufrido algún accidente en zonas muy oscuras o en lugares poco accesibles al ojo humano. Esta será, sin dudas, la herramienta ideal para localizar personas usada por los rescatistas.
- La cámara CGO-3+, es una cámara sencilla y estándar. Estas cámaras cumplen con distintas funciones como: búsqueda y rescate e inspecciones. Entre otras opciones esta cámara, encontramos que puede ser usada en modo panorámico e incluso time-lapse.

La Estación de Tierra ST16S es un transmisor integral y un receptor que aporta el pleno control del dron durante el vuelo permitiendo al piloto realizar la captura de fotos con facilidad.



Figura Número 3.43.-Estación de Tierra ST16S

Consta de una gran pantalla integrada de 7 pulgadas, en la que muestra imágenes en tiempo real del vuelo lo que facilita el trabajo y reduce el material al no tener que contar con un dispositivo externo. Otra gran ventaja es que permite planificar el vuelo en su pantalla táctil.

6.2. CONDICIONES ANTES DE REALIZAR UN VUELO CON DRON

Antes de realizar el vuelo para una mayor precisión y seguridad, se deben tener en cuenta las siguientes condiciones:

Condiciones que debe cumplir el piloto

- Para poder efectuar el vuelo, el piloto debe de estar dado de alta como operador en la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA).
- Disponer de un seguro de responsabilidad civil.
- Disponer de un certificado de conocimientos teóricos o una licencia de piloto emitida conforme a la normativa vigente.
- Disponer de un certificado de conocimientos y formación práctica sobre la aeronave que vayan a pilotar y sus sistemas, o bien sobre una aeronave de una categoría y tipo equivalente.
- Ser titulares de certificado médico en vigor, como mínimo Clase LAPL para aeronaves de hasta 25 kg de MTOM y Clase 2 o Clase 3 para aeronaves de MTOM superior a 25 kg, emitido por un centro médico aeronáutico o médico examinador aéreo autorizado.

Permiso de actuación

- Autorización de la empresa para realizar el trabajo aéreo sin causar alteraciones en las actividades de los trabajadores.
- Mantener informados de toda actuación que se lleve a cabo en el recinto.

Plan contra cambios meteorológicos

- Frente a cambios meteorológicos repentinos, como tormentas, vientos, lluvias o granizos, el vuelo deberá de ser cancelado.
- Si el dron está volando cuando se origina el cambio meteorológico, el piloto deberá de aterrizar el dron lo antes posible.

6.3. COMPROBACIONES

Comprobaciones previas al vuelo

- Comprobaciones meteorológicas. Aunque se haya examinado el tiempo antes de elegir el día del vuelo, el tiempo real puede diferir con lo previsto.
- Comprobar que se dispone de un espacio suficiente para volar.
- Calcular que la altura de vuelo sea adecuada.
- Revisar estructura y tornillería del dron.
- Verificar que la batería del transmisor este cargada.
- Verificar que la batería del dron tiene carga suficiente para efectuar el vuelo completo, así como verificar las baterías de repuesto por si fuera necesario hacer uso de ellas.
- Comprobar que la batería este bien colocada.
- Comprobar que la tarjeta SD tenga capacidad de almacenamiento.
- Comprobar que la lente esté limpia.
- Comprobar que las hélices están bien colocadas.
- Comprobar que no hay obstáculos imprevistos.
- Revisar el plan de vuelo.

Comprobaciones durante el vuelo

- Comprobar en todo momento los niveles de batería del transmisor y del dron.
- Comprobar la altura de vuelo y velocidad en todo momento.
- Comprobar la distancia de alcance del dron a el transmisor, ya que al perder la conexión podría caer y ocasionar un accidente.

Comprobaciones post vuelo

- Apagar el dron.
- Transferencia de datos a un sistema de almacenamiento seguro.
- Desarmar el dron.
- Desconectar la batería.
- Guardar dron y baterías.

6.4. PLANIFICACIÓN DEL VUELO

Como se ha comentado anteriormente, la planificación del vuelo se ha realizado desde La Estación de Tierra ST16S. Este paso es uno de los más relevantes ya que permite que las fotografías obtenidas sean las deseadas.

Antes de realizar las fotografías cenitales, se realiza un vuelo a 45° alrededor de la nave, lo que permite tener más fotografías de la misma y así obtener una nube de puntos más densa.

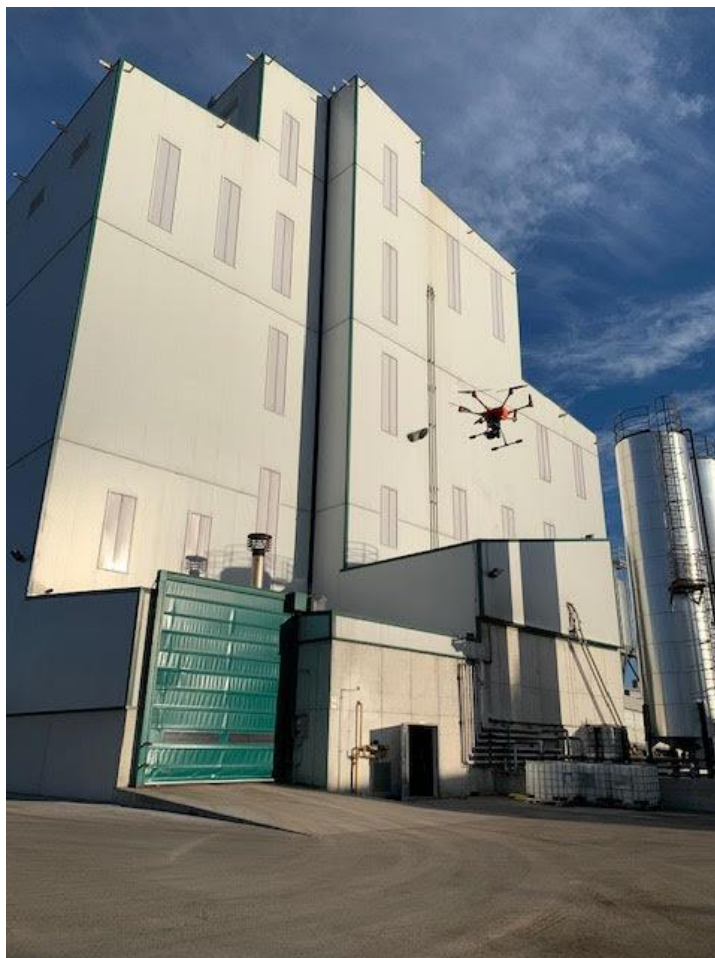


Figura Número 3.44.-Vuelo con dron a 45°

Para el vuelo a 45° no es necesario una planificación, directamente el piloto vuela el dron deteniéndose en las zonas donde se desea realizar las fotografías, obteniendo un total de 169, proporcionando un buen recubrimiento.

Posteriormente se procede a la planificación del vuelo, para la cual es preciso introducir los siguientes datos:

- Velocidad de la aeronave: 15m/s
- Altura de vuelo 1: 50m
- Altura de vuelo 2: 65 m.
- Fotografías a realizar: 45

Se realizaron dos vuelos para tomar más fotografías desde una altura superior.

Al terminar el vuelo el piloto dirige el dron a la zona de aterrizaje de forma manual, descendiendo progresivamente y aterrizando el dron en un espacio seguro.

Posteriormente, el dron se apaga e insitu se comprueba que las fotografías han sido tomadas correctamente, así mismo, las fotografías se introducen en el programa Agisoft PhotoScan Professional para verificar que la nube de puntos es correcta, y no es necesario realizar otro vuelo.

Una vez realizado el vuelo y comprobado que todo ha salido correctamente, el dron, las baterías y la estación de tierra se guardan en su estuche para su siguiente vuelo.

Antes de realizar el trabajo en gabinete, es necesario tomar los puntos de apoyo, los cuales permiten orientar correctamente el modelo.

Para ello se ha utilizado una estación total topográfica total (ETT) marca Leica TS02.

Aprovechando las tres bases de referencia calculadas para el Levantamiento Topográfico mediante Topografía Clásica, se ha realizado una radiación, a partir de la cual se obtienen seis puntos de apoyo previamente seleccionados. Estos puntos están situados en zonas estratégicas, fácilmente visibles, ya que posteriormente se incluirán en el modelo de forma manual. Así mismo la ubicación de estos debe ser uniforme, es decir, tres puntos a un lado de la nave y otros tres al otro lado, permitiendo así una correcta orientación de la misma. A continuación, se muestran las coordenadas obtenidas de los seis puntos de apoyo elegidos.

COORDENADAS PUNTOS DE APOYO			
	X	Y	Z
1	416018,597	4797715,463	73,414
2	416017,414	4797640,160	73,717
3	415940,460	4797695,323	73,210
4	416015,757	4797734,810	72,900
5	415963,893	4797651,122	73,524
6	415984,964	4797621,088	73,636

Tabla Número 3.3.-Coordenadas de los puntos de apoyo

6.5. TRABAJO EN GABINETE

Los resultados obtenidos en la medición, se procesan posteriormente en el gabinete con el software Agisoft PhotoScan Professional. Este software permite procesar imágenes digitales y, mediante la combinación de técnicas de fotogrametría digital y visión por computador, generar una reconstrucción 3D del entorno.

En el menú principal de Agisoft, como se muestra en la siguiente figura, se selecciona la opción “Añadir fotos...” donde se cargan todas las fotografías realizadas en el vuelo descartando aquellas que carezcan de interés para el trabajo.

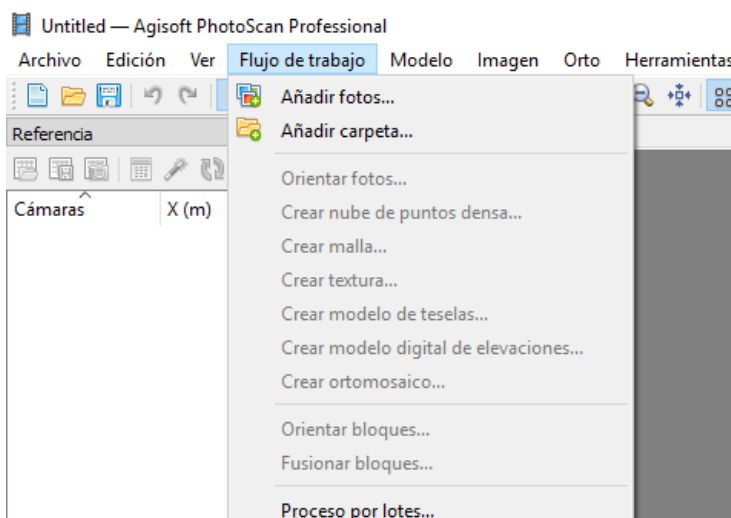


Figura Número 3.45.-Añadir fotos en Agisoft

Una vez se hayan cargado todas las fotografías, se procede a la orientación de las mismas. Según la figura anterior la opción “Orientar fotos” donde el programa reconoce la posición desde la que se han tomado y las orienta. Previamente se abrirá una ventana en la que se indican las opciones sobre la calidad con la que se quiere trabajar. En este caso en una prueba inicial conviene elegir la opción de baja resolución, para únicamente comprobar que la orientación ha sido correcta, mientras que el resto de opciones quedan por defecto. Después de verificarlo, se indica la opción de alta resolución, quedando como resultado la siguiente figura.

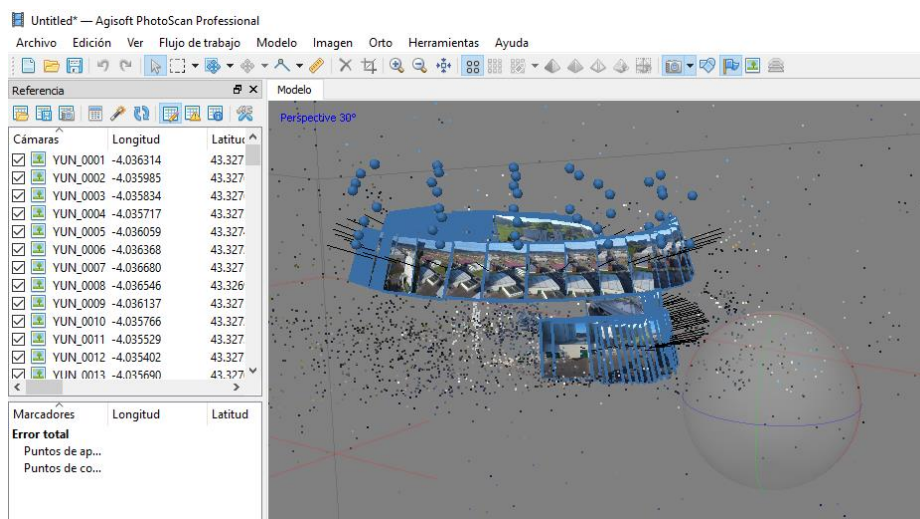


Figura Número 3.46.-Fotografías orientadas

Antes de seguir con el siguiente paso, es necesario guardar el proyecto ya que los siguientes pasos son más densos a la hora de procesar y se podrían perder los datos obtenidos hasta el momento.

Como se puede apreciar en la siguiente figura, aparece una nube de puntos dispersa alrededor de las fotografías, el siguiente paso es crear la nube de puntos la cual permitirá crear la malla del modelo, para ello se selecciona la opción “Crear nube de puntos densa...” donde una vez más se abrirá otra ventana en la cual se seleccionarán las opciones de calidad deseadas.

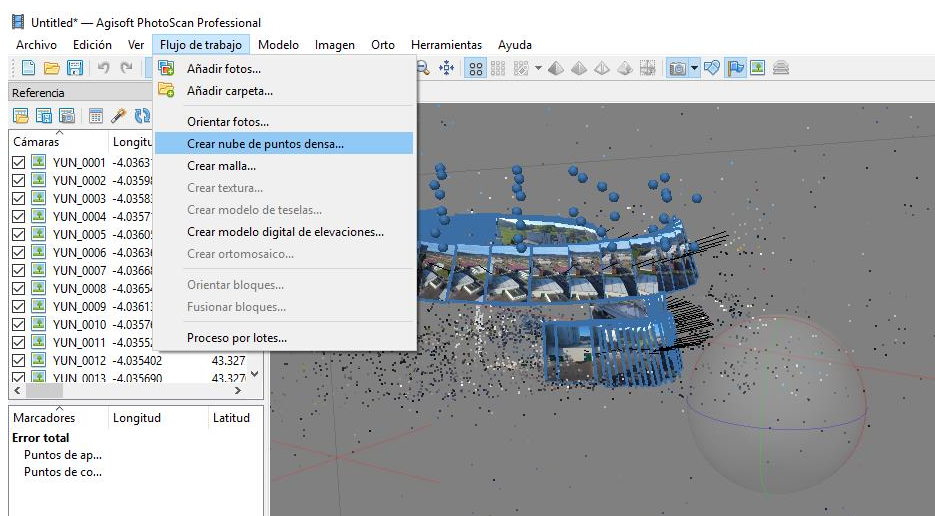


Figura Número 3.47.- Creación de la nube de puntos

El resultado de la nube de puntos se muestra en la siguiente figura, en la cual ya se puede apreciar con más claridad la estructura del edificio.

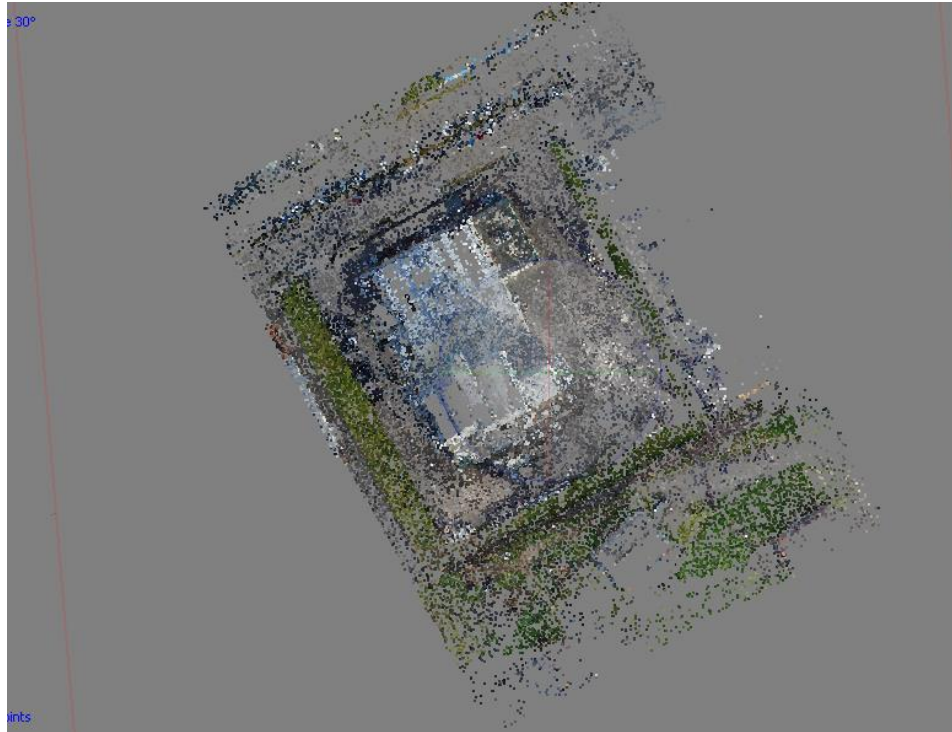


Figura Número 3.78.-Nube de puntos

Seguidamente de generar la nube densa de puntos procedemos a crear la malla que nos servirá de base para generarle una textura al modelo. Este proceso es uno de los más lentos, dependiendo de la cantidad de puntos que tenga la nube densa y la calidad elegida puede tardar varias horas en crearse. A continuación, se observa como ha convertido la nube de puntos en la malla.



Figura Número 3.49.- Creación de la malla

A partir de la malla generada, se crea una textura, de igual forma en el menú principal de la figura 97, se selecciona crea textura. En la siguiente figura se exponen las opciones seleccionadas para la creación de la misma, donde el modo genérico, permite parametrizar atlas de textura para geometría arbitraria, proporcionando una textura lo más uniforme posible.

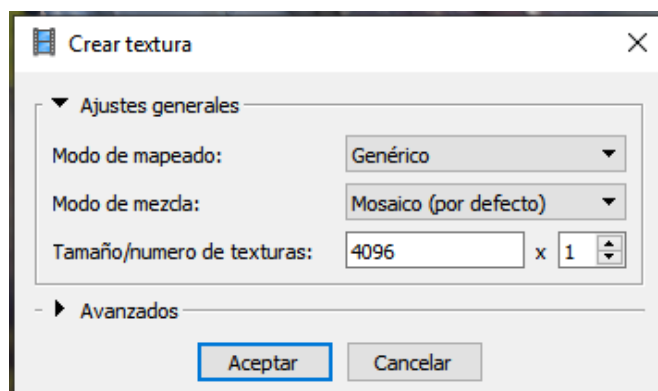


Figura Número 3.50.- Opciones de textura elegidas

El siguiente paso consiste en añadir los puntos de apoyo, este paso puede hacerse de diferentes formas, en este trabajo, se ha optado por añadir los marcadores directamente sobre el modelo. El programa identifica el marcador y filtra las fotografías en las que se encuentra el punto, como se puede apreciar en la siguiente figura. Se han insertado seis puntos de apoyo, los cuales se han ido corrigiendo manualmente en cada una de las fotografías donde aparecen. Posteriormente se introducen las coordenadas obtenidas en campo, así como el sistema de referencia que, en este caso es el ETRS89/UTM zone 30N.

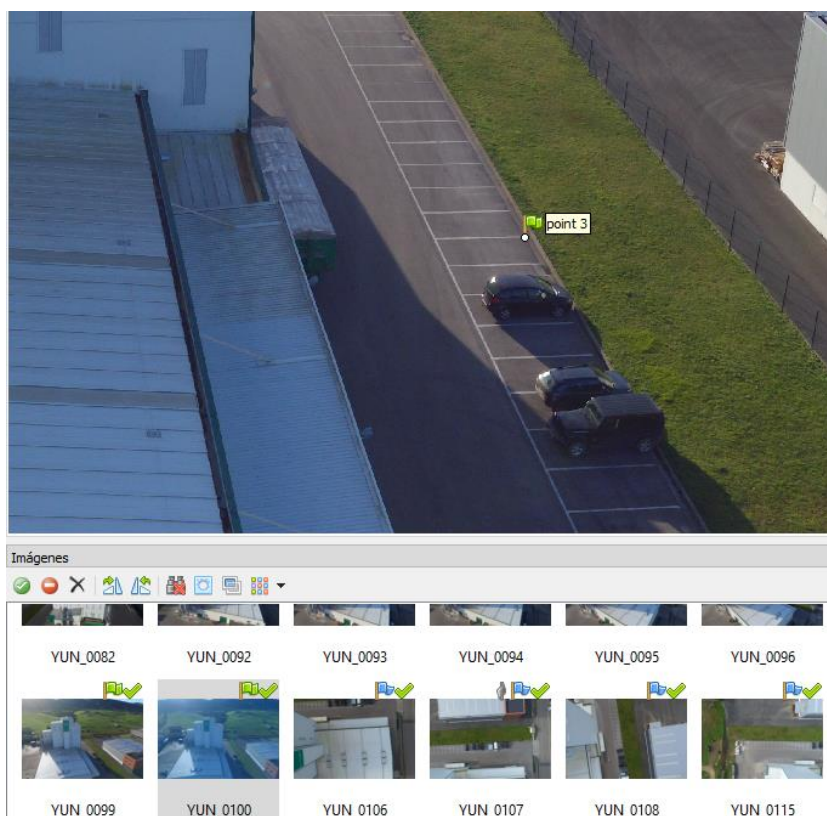


Figura Número 3.51.-Posicionamiento de un punto de apoyo

Tras orientar el modelo, se debe optimizar la orientación de las cámaras, en la siguiente imagen se muestran los ajustes generales que aparecen por defecto, las cuales se dejan seleccionadas y se acepta, consiguiendo un modelo totalmente orientado.

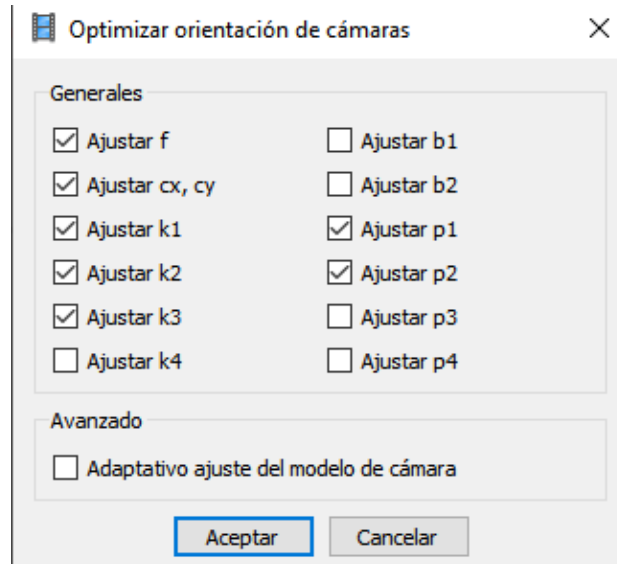


Figura Número 3.52.- Optimizar orientación de las cámaras

Por último, para una correcta modelización es necesario nuevamente realizar la nube de punto densa y la malla de igual forma que en los pasos anteriores, cuando se hayan generado, en el menú principal, flujo de trabajo, se selecciona la opción “crear modelo digital de elevaciones...” Obteniéndose el MDT mostrado a continuación.



Figura Número 3.53.-Vista principal Modelo Digital de Elevaciones



Figura Número 3.54.- Vista trasera Modelo Digital de Elevaciones



Figura Número 3.55.- Vista lateral Modelo Digital de Elevaciones

CAPÍTULO IV: CONTRASTE DE RESULTADOS

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	118
2. RESULTADOS OBTENIDOS	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Número 4.1.- Vista nube de puntos densa.....	118
Figura Número 4.2.- Herramienta cerrar agujeros de la malla.....	119
Figura Número 4.3.- Medir Volumen.....	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla Número 4.1.-Tabla de resultados.....	138
--	-----

1. INTRODUCCIÓN

Puesto que el objeto de este trabajo fin de grado es el estudio comparativo de un determinado objeto existente en el territorio, utilizando, en un primer instante metodologías topográficas clásicas y seguidamente métodos fotogramétricos con dron, en el presente capítulo se exponen los resultados y conclusiones obtenidas en ambos procesos.

El resultado obtenido en ambas metodologías es un Modelo Digital del Terreno, en el cual las magnitudes a contrastar son Distancias, Alturas, Superficies, Volúmenes, así como el posicionamiento de puntos concretos.

Dichos resultados se analizan en el siguiente apartado, proporcionando una postura clara sobre qué metodología presenta una mayor precisión.

2. RESULTADOS OBTENIDOS

El MDT obtenido mediante topografía clásica, se ha realizado en AutoCad. Este programa permite medir distancias con la herramienta “medir”, que, delimitando los puntos de la distancia que se desea calcular, proporciona la longitud deseada. Para medir áreas, perímetros y volúmenes, basta con escribir el comando “volumen” y seleccionando la zona que se desea medir, el programa abre una ventana con todos los datos. Por último, para la medida de coordenadas de un punto cualquiera, se selecciona el punto que se desean conocer sus coordenadas, y mediante la herramienta “propiedades” el programa muestra las coordenadas x, y, z del punto.

En cuanto al MDT obtenido mediante fotogrametría con dron, los datos se han procesado en Agisoft. Esta herramienta permite al igual que AutoCad la medida de distancias entre dos puntos, para ello en el menú principal aparece una regla, que, seleccionando los extremos de la distancia que se desea contrastar, se obtiene la medida, así mismo al seleccionar los puntos de la distancia aparecen sus coordenadas. El cálculo del perímetro se realiza dibujando un polígono sobre la parte que se desea medir. Una vez dibujado, seleccionando el polígono con el botón derecho del ratón, aparece la opción “medición”, la cual proporciona el perímetro total del polígono.

Para el cálculo del volumen han sido necesarios varios pasos, los cuales se muestran a continuación.

Para empezar, es necesario la visualización de la nube de puntos densa, en la cual se limpian todos aquellos puntos que no formen parte del volumen que se desea medir.



Figura Número 4.1.- Vista nube de puntos densa

Una vez recortado, se crea de nuevo la malla, en la cual posteriormente se cerrarán los agujeros ocasionados por el recorte. El procedimiento a seguir es el mostrado a continuación, desplegando del menú principal la paleta de “herramientas”, se selecciona la opción “malla”, “cerrar agujeros” proporcionando una maya completamente cerrada.

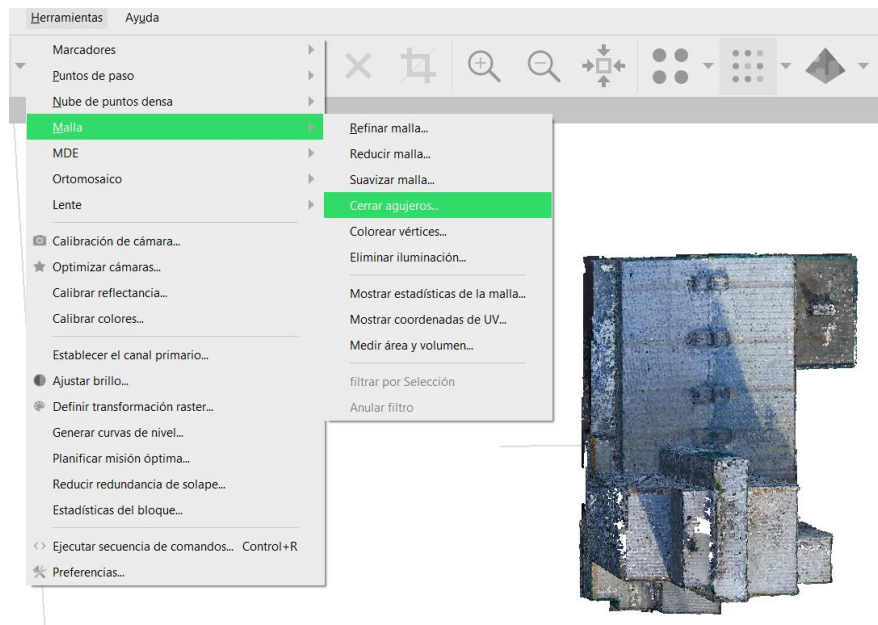


Figura Número 4.2.- Herramienta cerrar agujeros de la malla

Una vez se haya creado la malla y cerrado los agujeros, simplemente se siguen los pasos mostrados en la siguiente imagen, en la paleta de “herramientas”, se selecciona la opción “malla”, “medir área y volumen”.

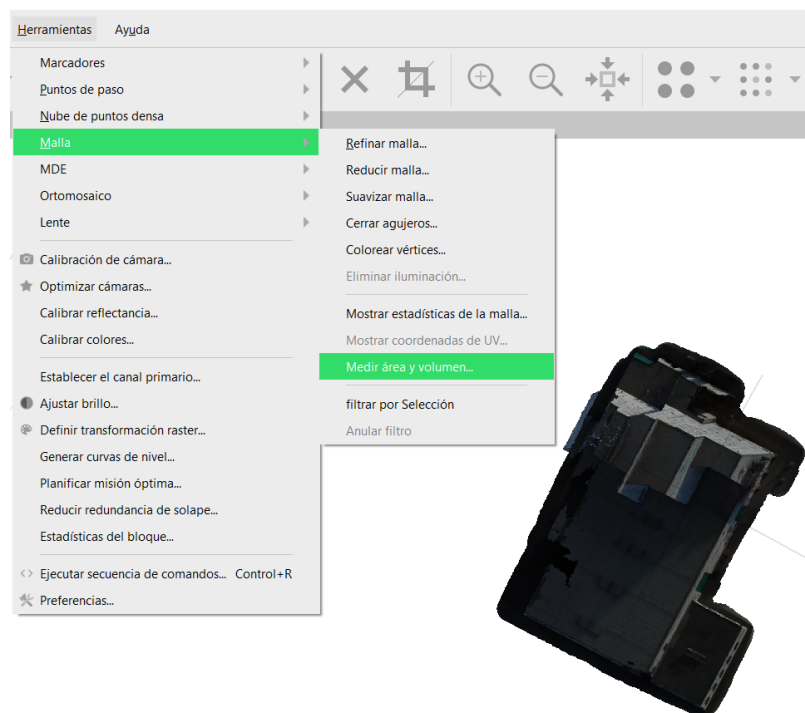
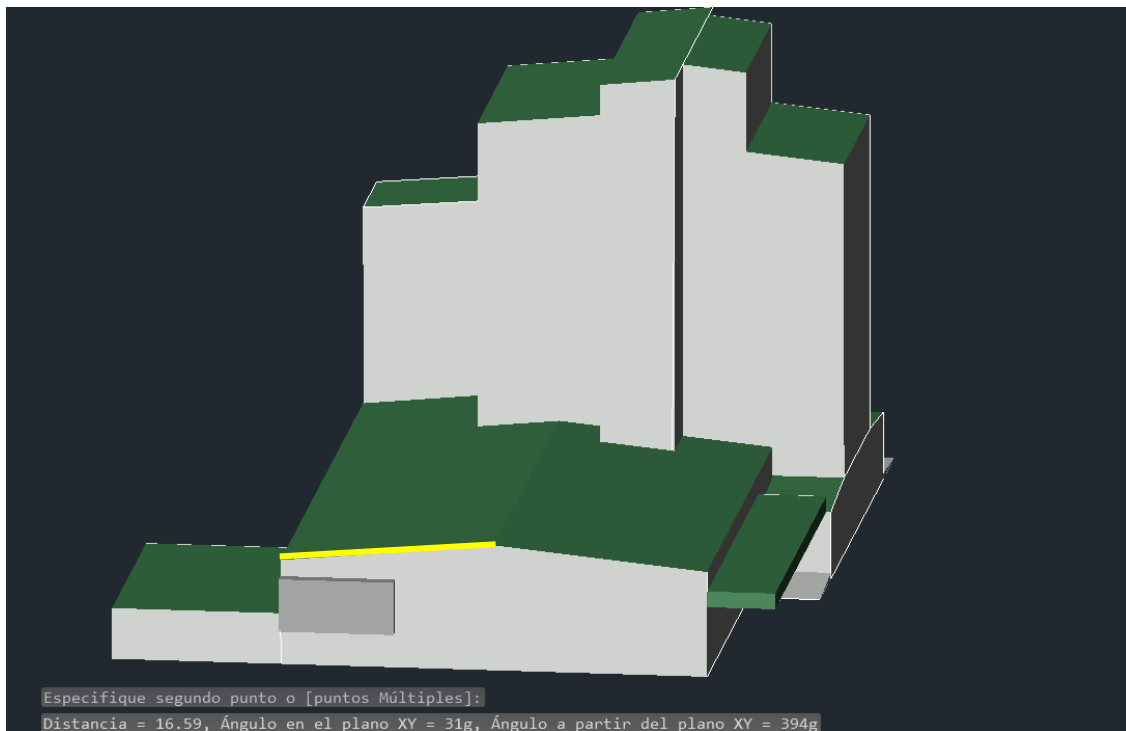


Figura Número 4.3.- Medir Volumen

A continuación se muestran los resultados obtenidos en ambos modelos.

DISTANCIAS

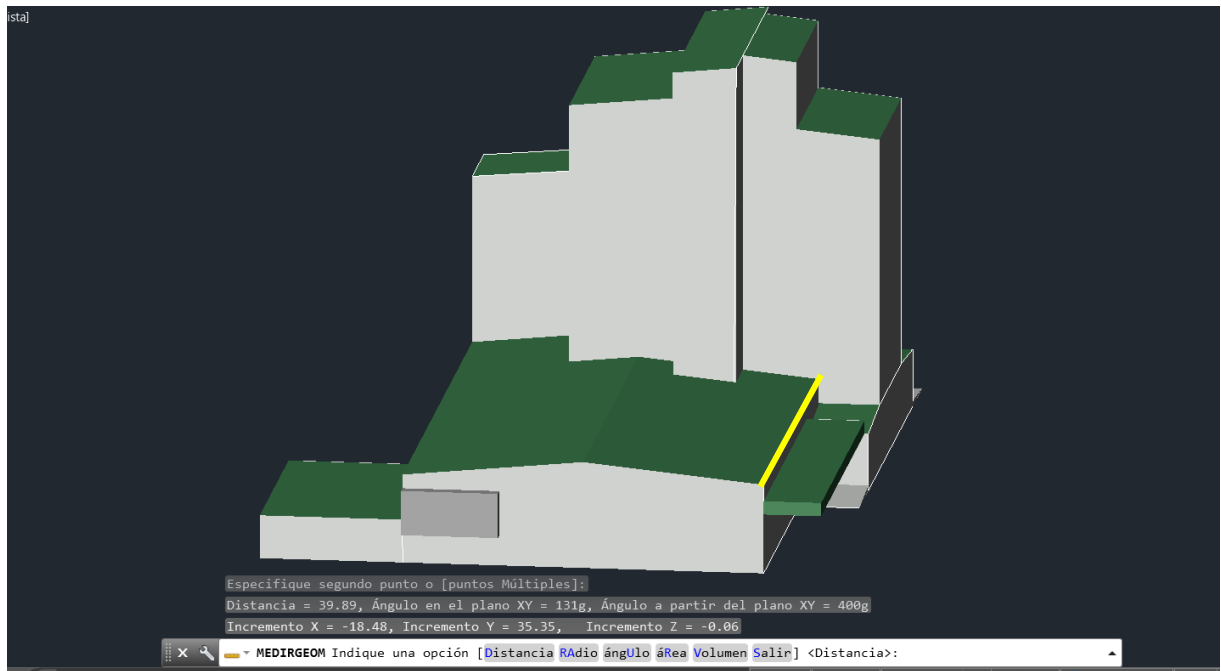
Distancia AutoCad: 16.59m



Distancia Agisoft: 16.4m



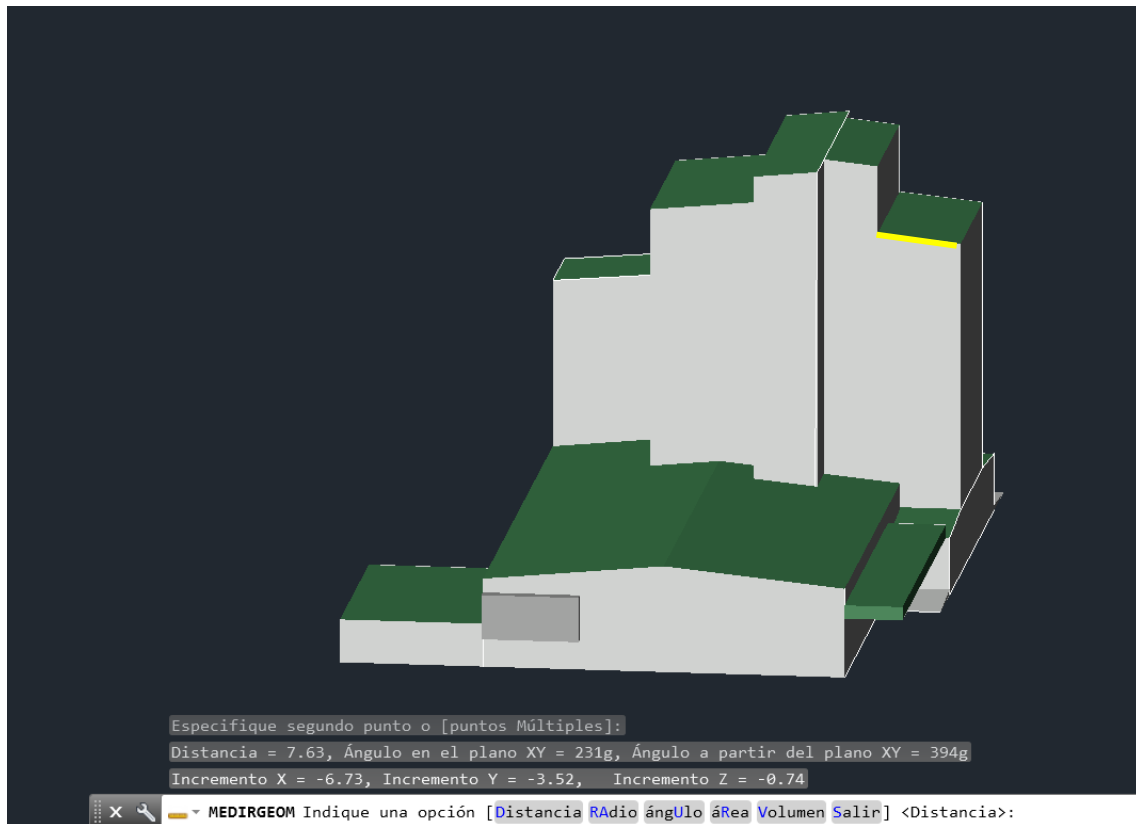
Distancia AutoCad: 39.89m



Distancia Agisoft: 39.9m



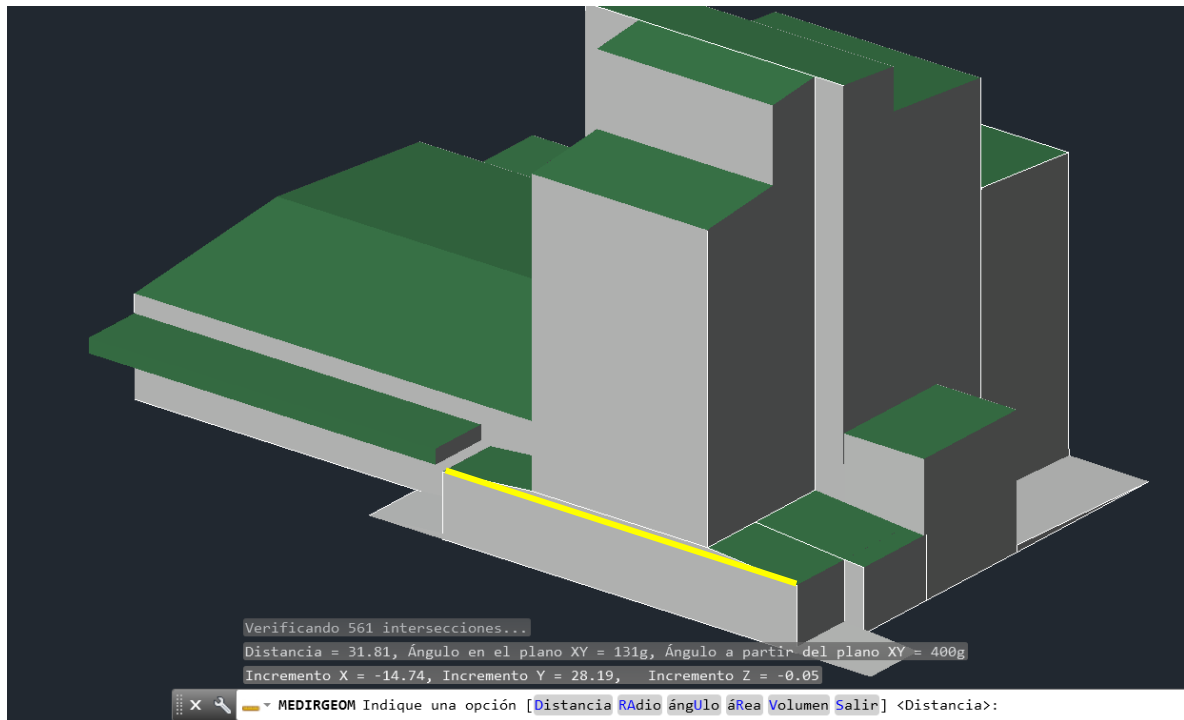
Distancia AutoCad: 7.63m



Distancia Agisoft: 7.65m



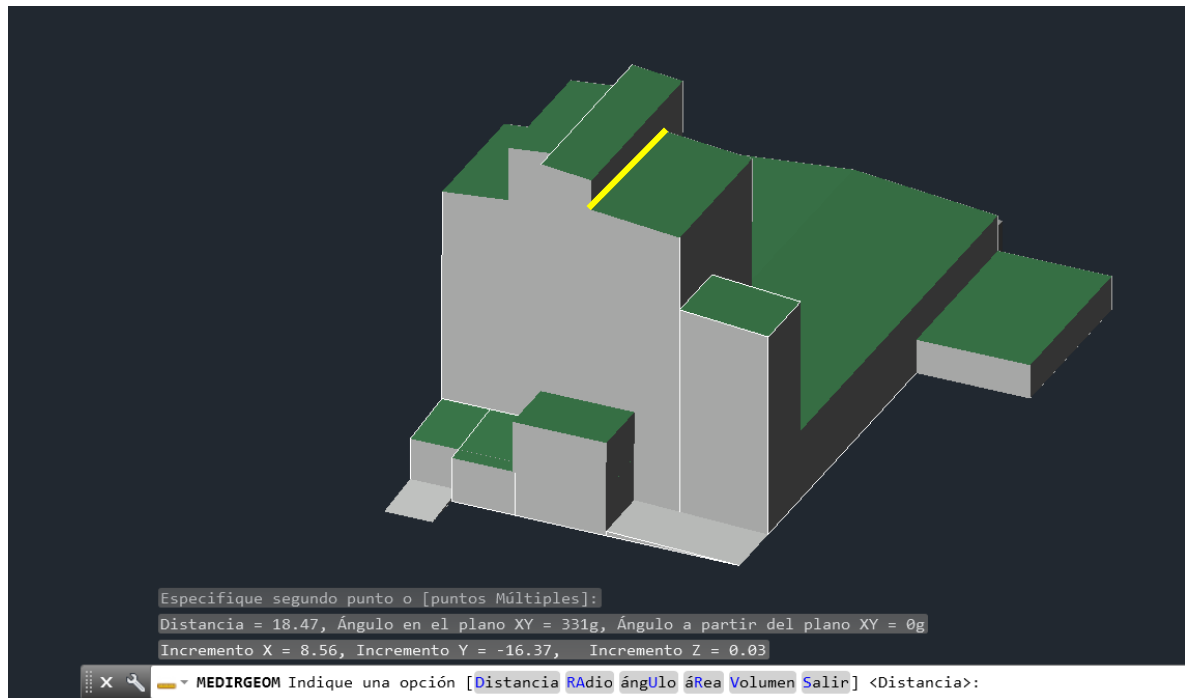
Distancia AutoCad: 31.81m



Distancia Agisoft: 31.5m



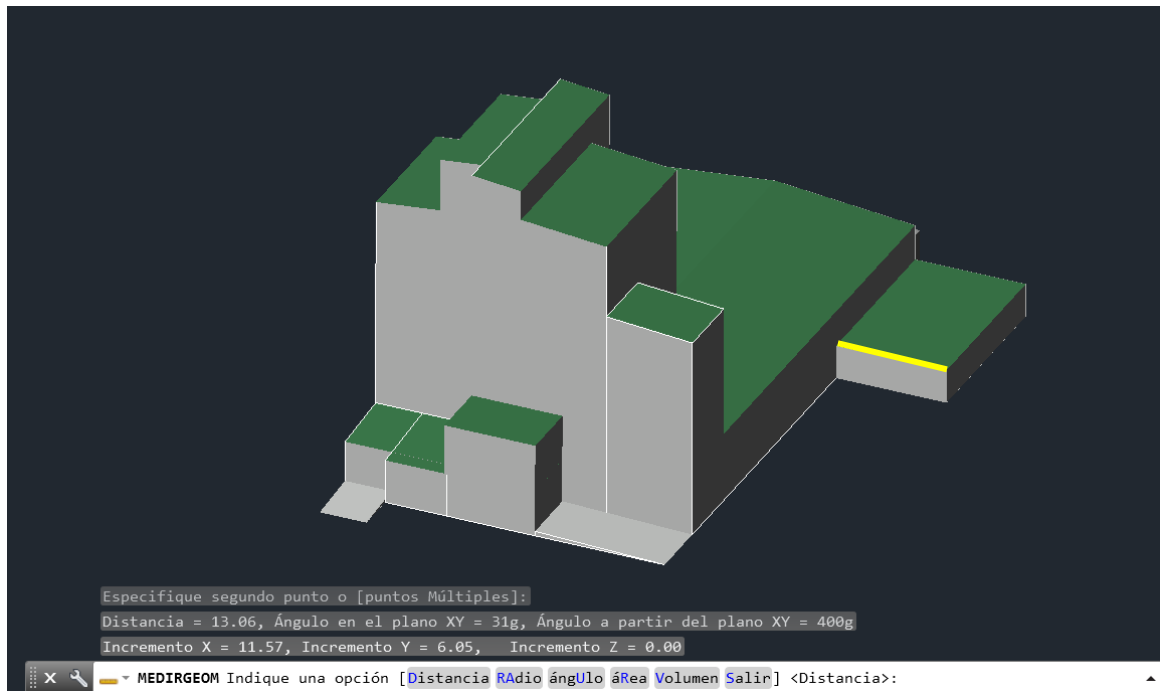
Distancia AutoCad: 18.47m



Distancia Agisoft: 17.5m



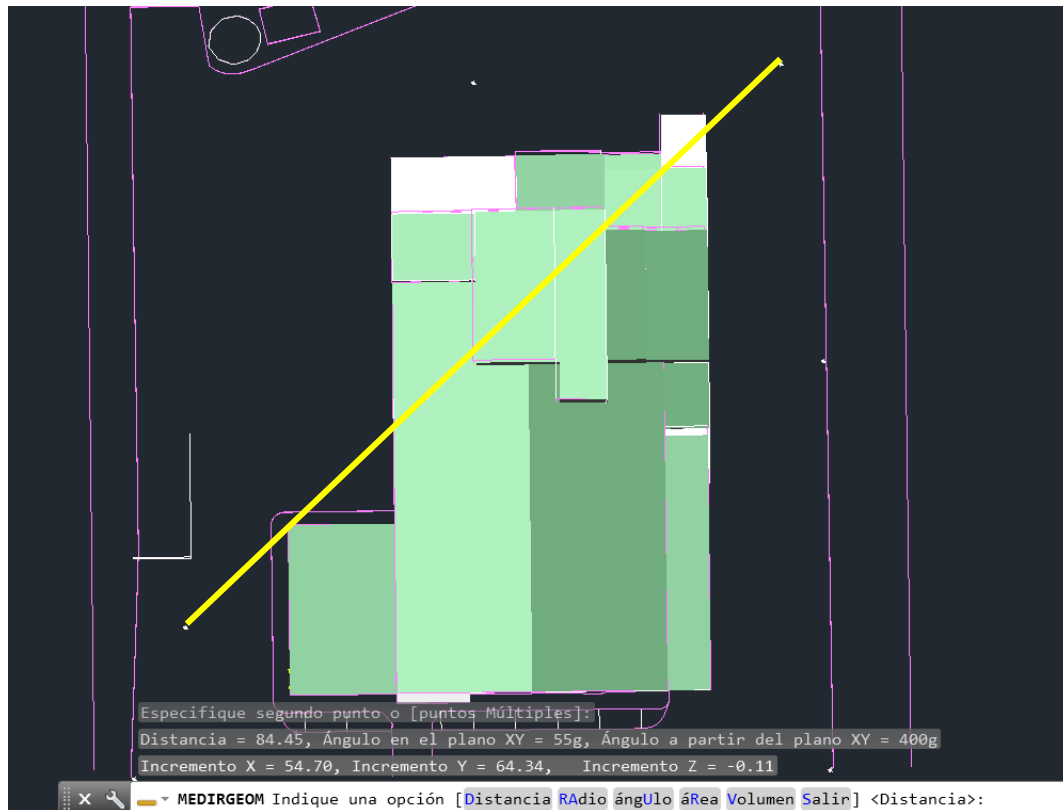
Distancia AutoCad: 13.06m



Distancia Agisoft: 12.3m



Distancia AutoCad: 84.45m

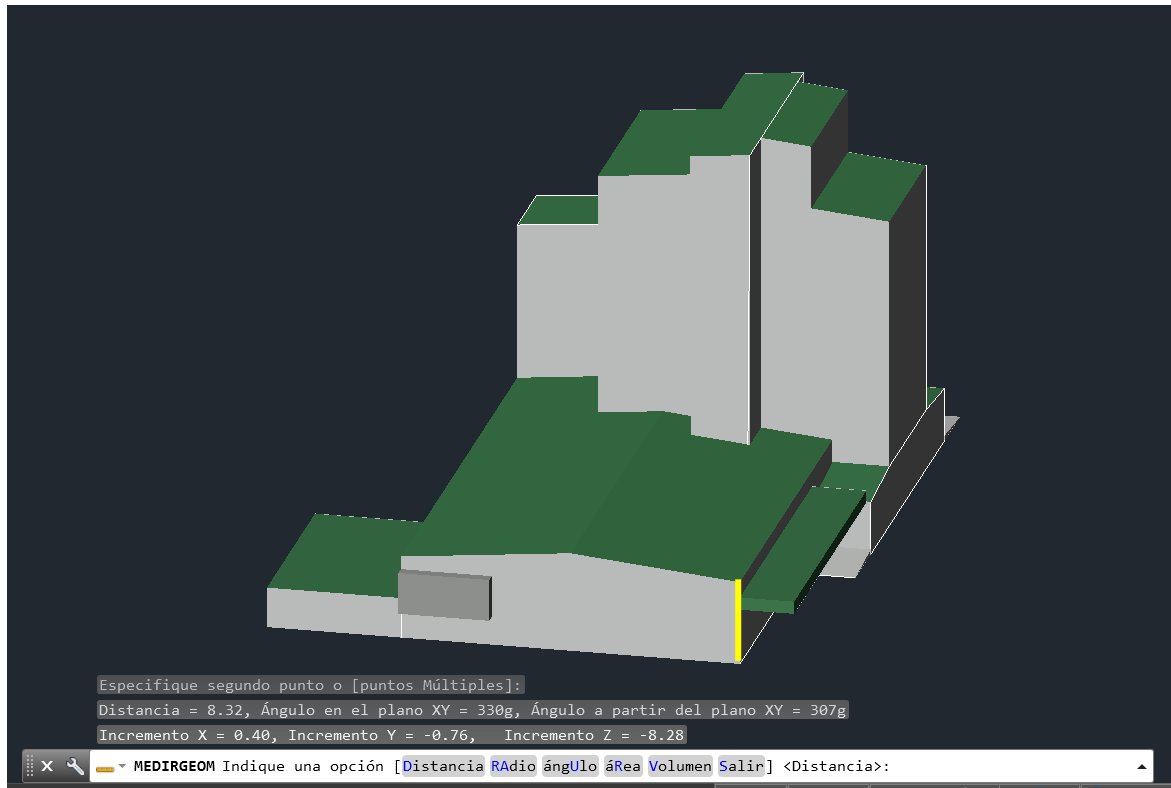


Distancia Agisoft: 85.2m



ALTURAS

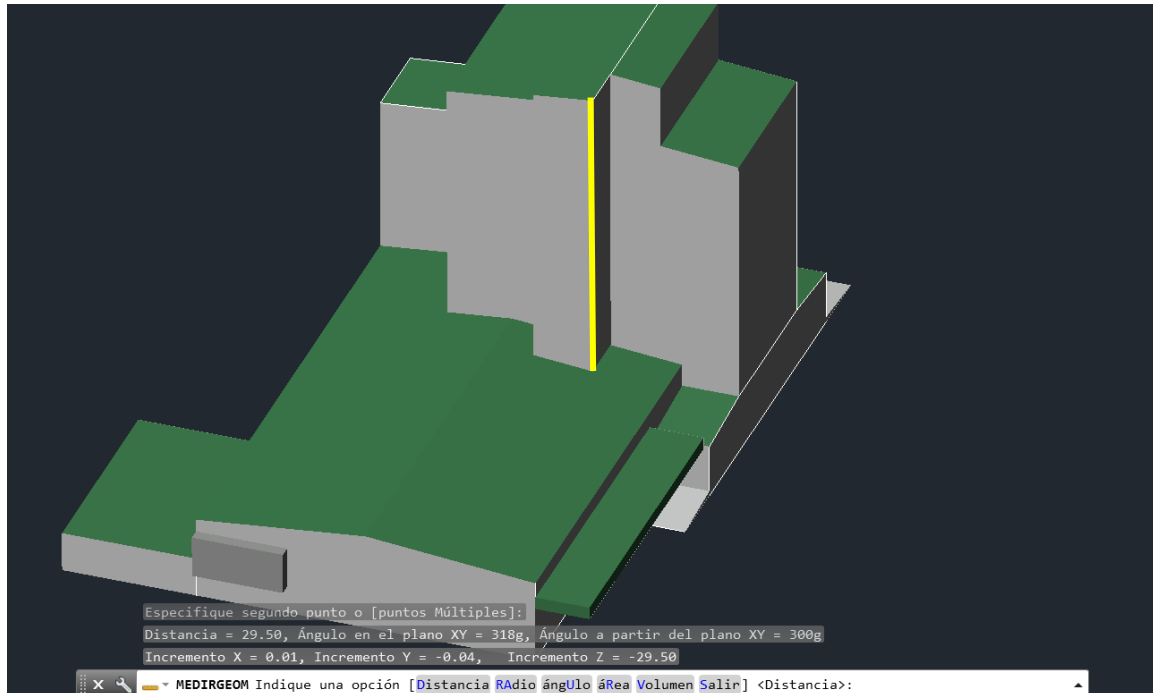
Altura AutoCad: 8.32m



Altura Agisoft: 8.15m



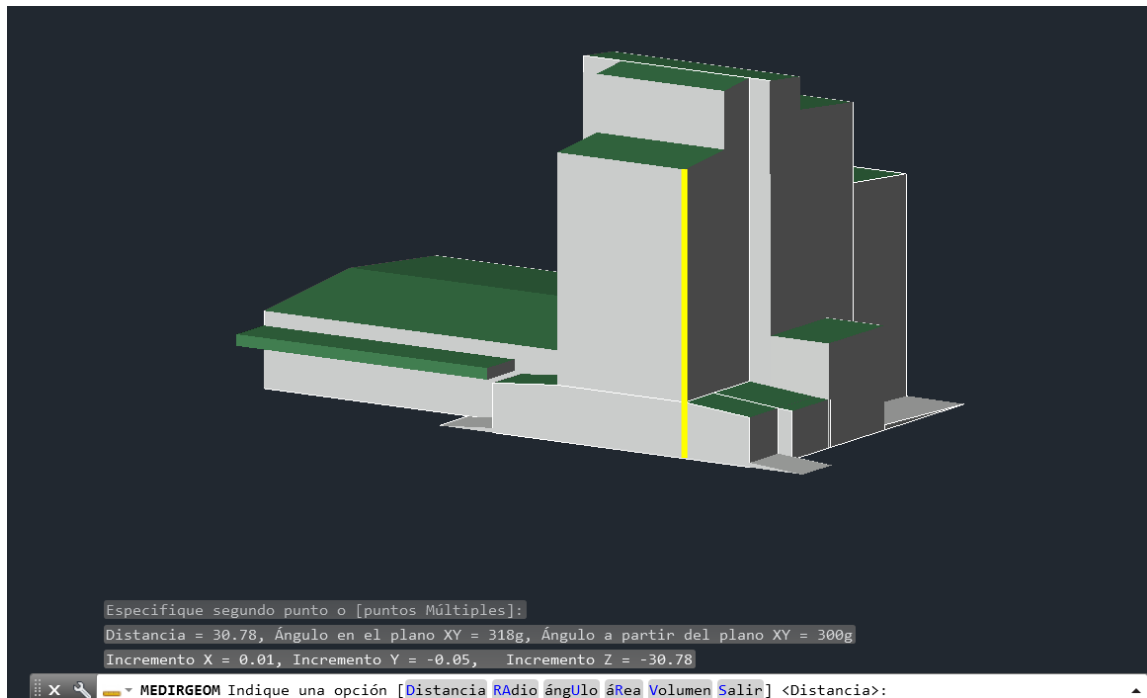
Altura AutoCad: 29.50m



Altura Agisoft: 29.10m



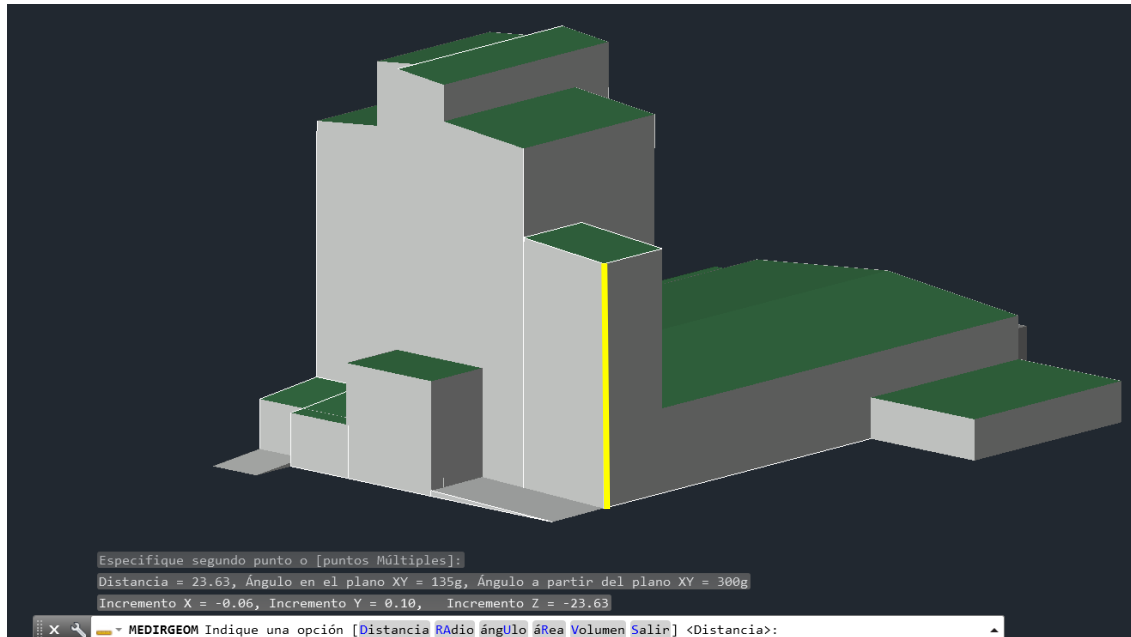
Altura AutoCad: 30.78m



Altura Agisoft: 30.6m



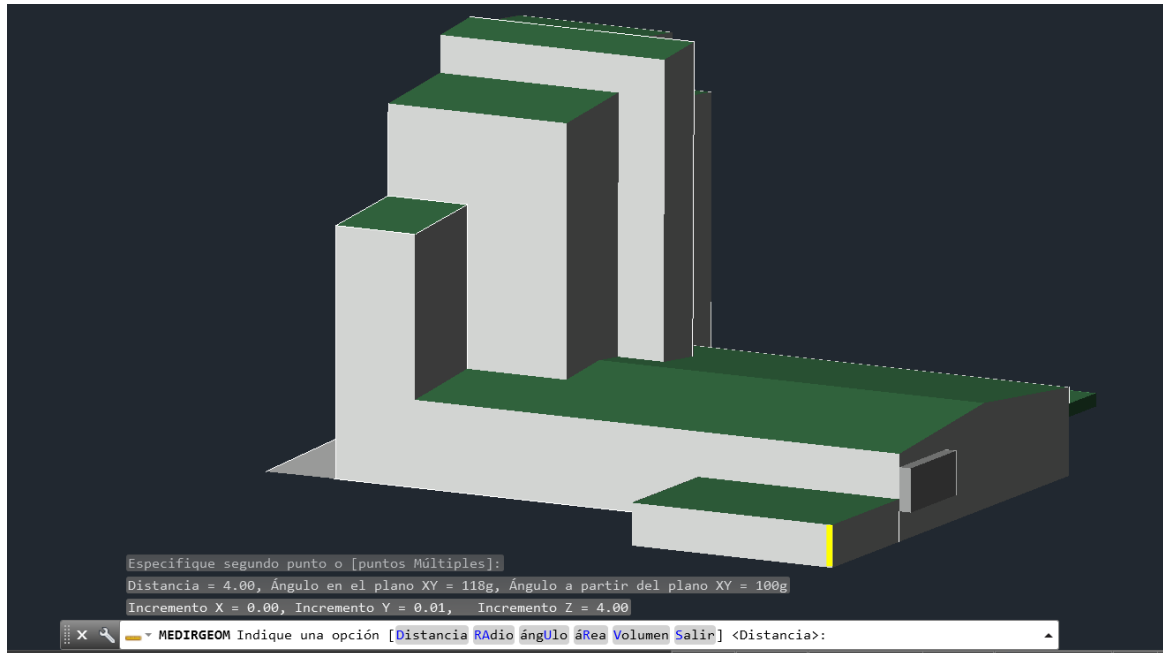
Altura AutoCad: 23.63m



Altura Agisoft: 23.2m



Altura AutoCad: 4m

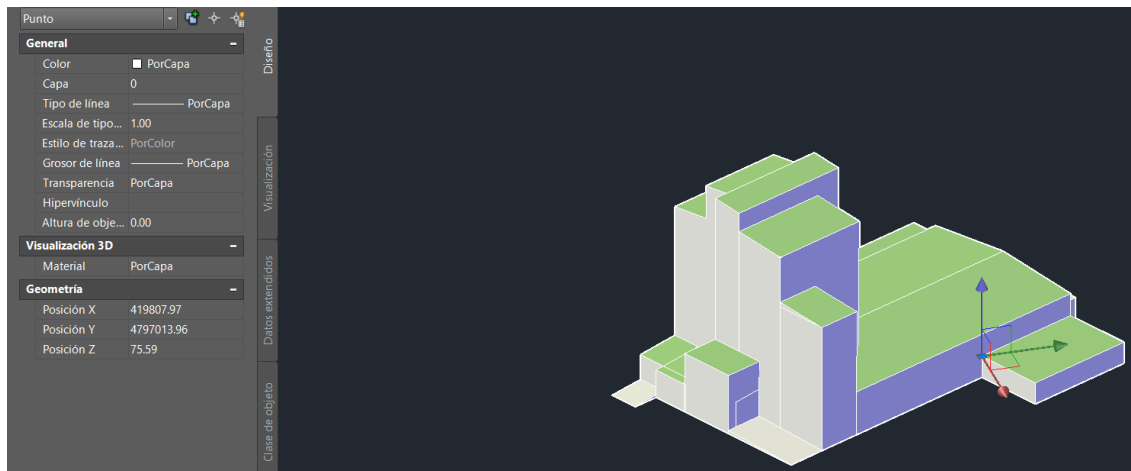


Altura Agisoft: 3.96m



COORDENADAS

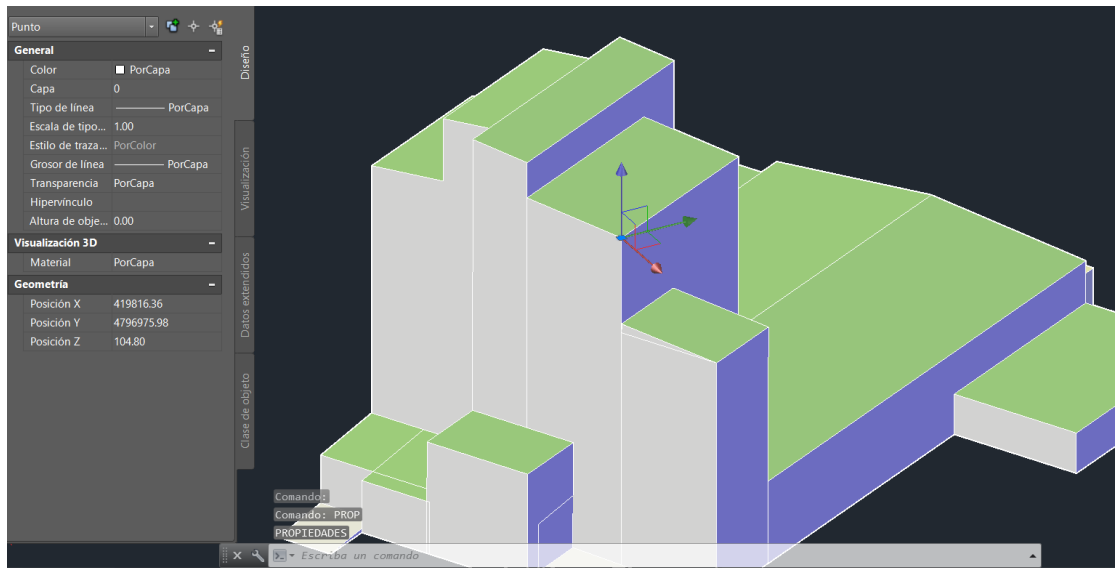
Coordenadas AutoCad: x=419807.97 y=4797013.96 z=75.59



Coordenadas Agisoft: x=416001.62 y=4797692.90 z=77.84



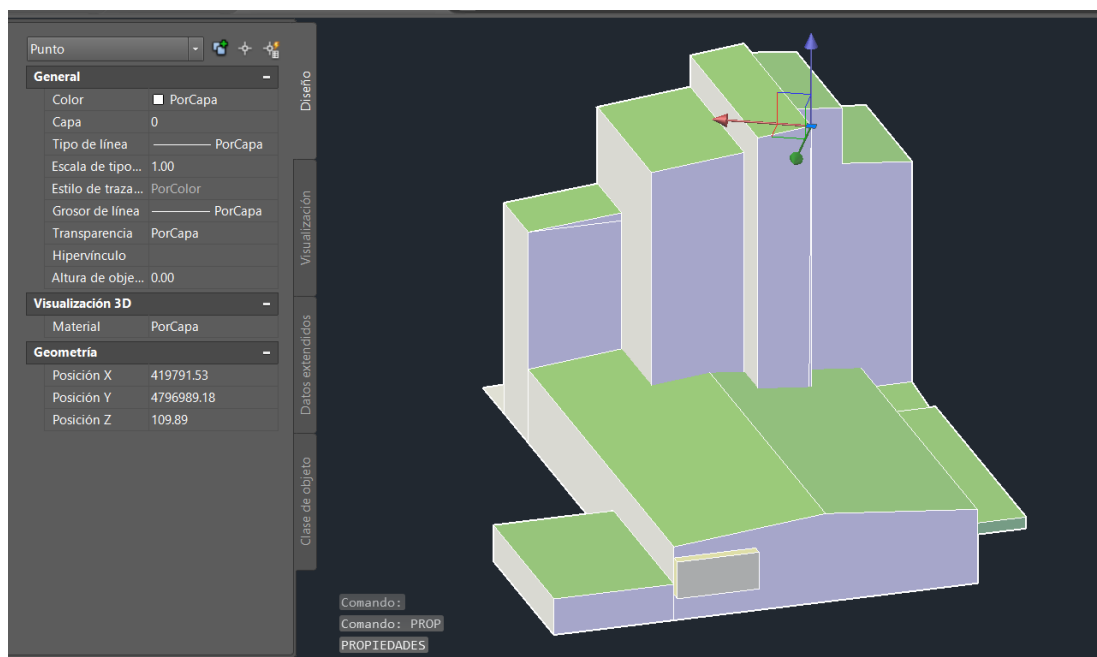
Coordenadas AutoCad: x=419816.36 y=4796975.98 z=104.80



Coordenadas Agisoft: x=416009.24 y=4797656.77 z=106.904



Coordenadas AutoCad: x=419791.53 y=4796989.18 z=109.89

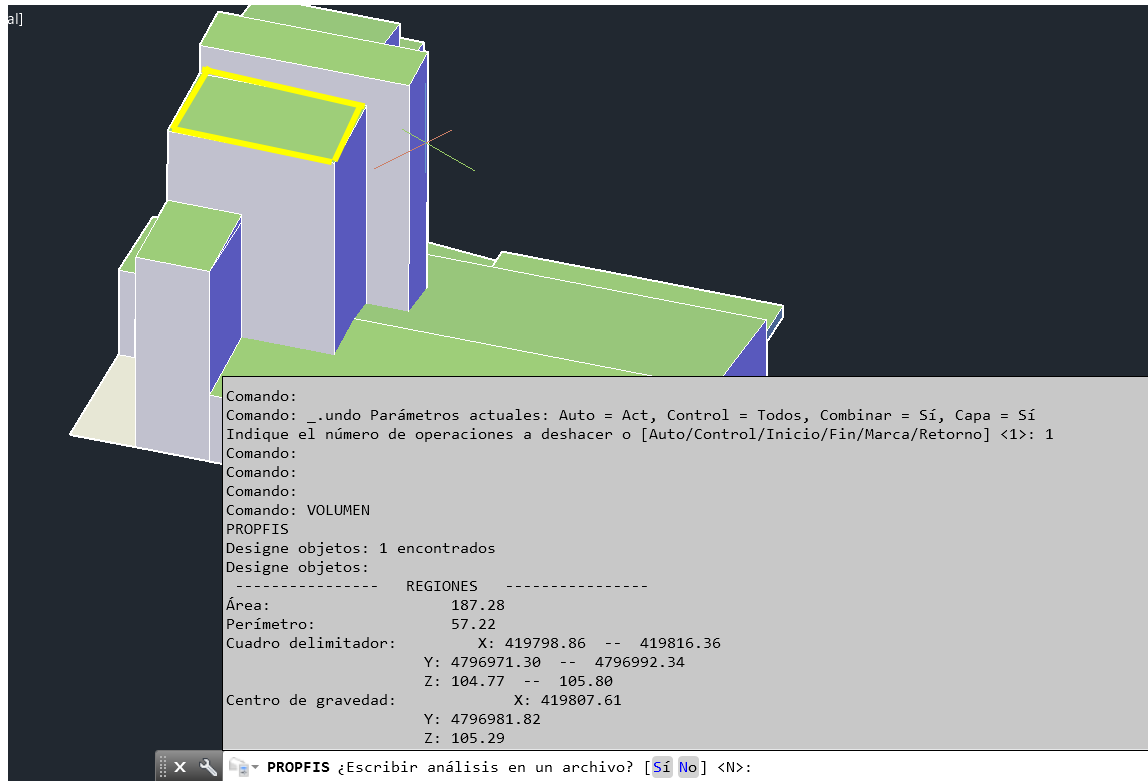


Coordenadas Agisoft: x=415985.89 y=4797667.99 z=111.97

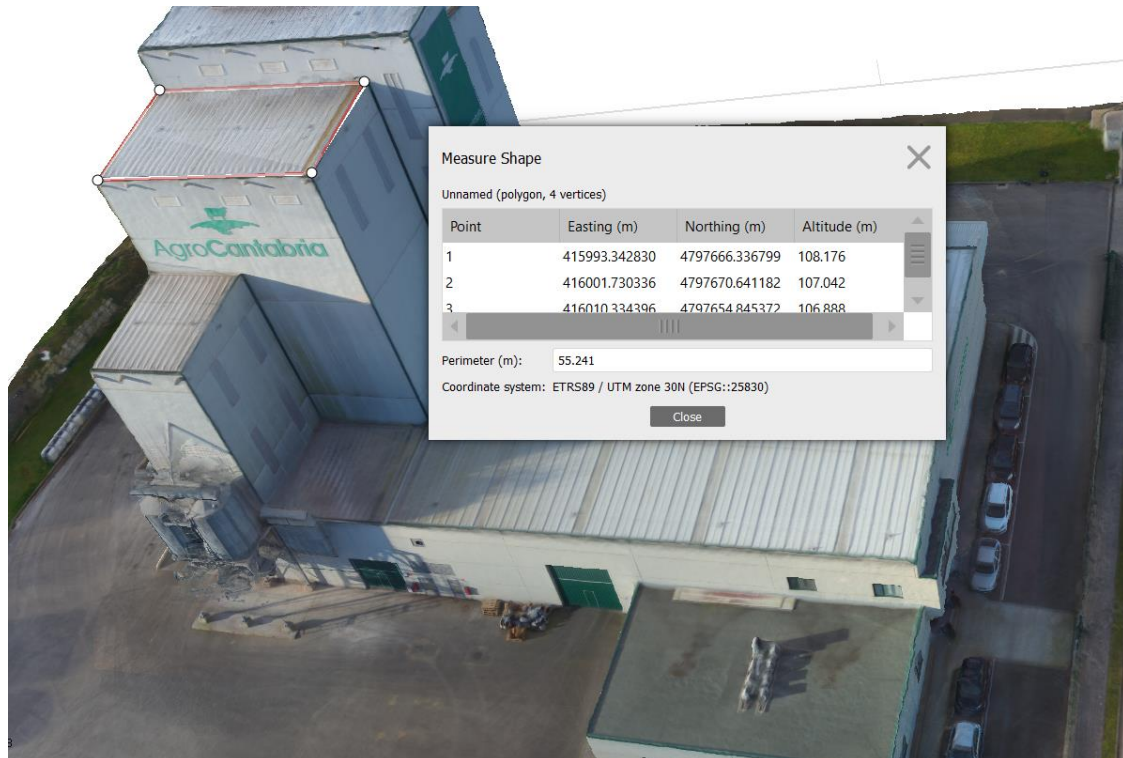


PERÍMETROS

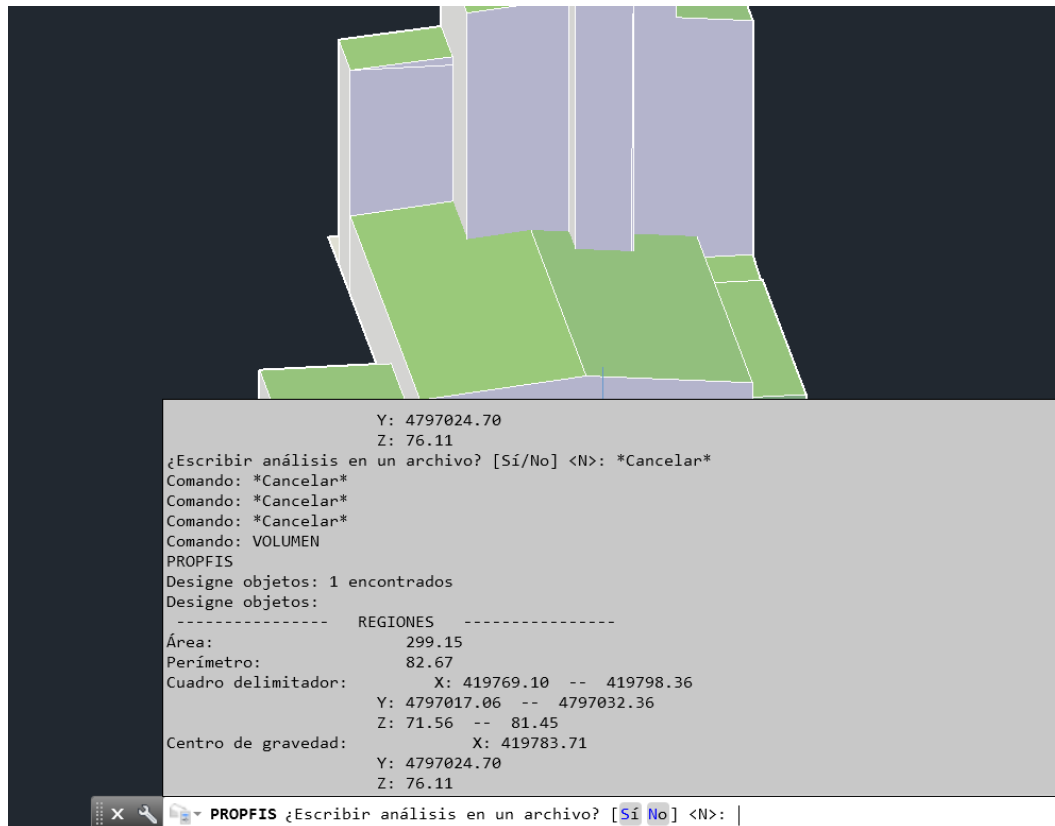
Perímetro AutoCad: 57.22m



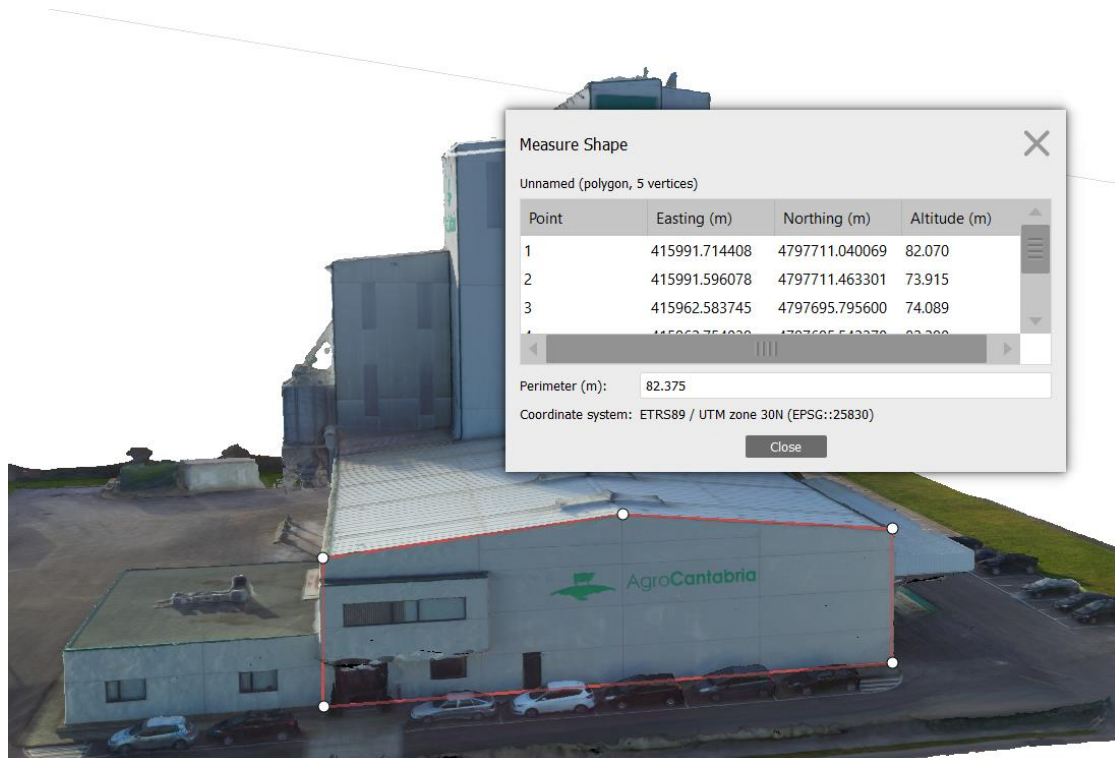
Perímetro Agisoft: 55.241m



Perímetro AutoCad: 82.67m

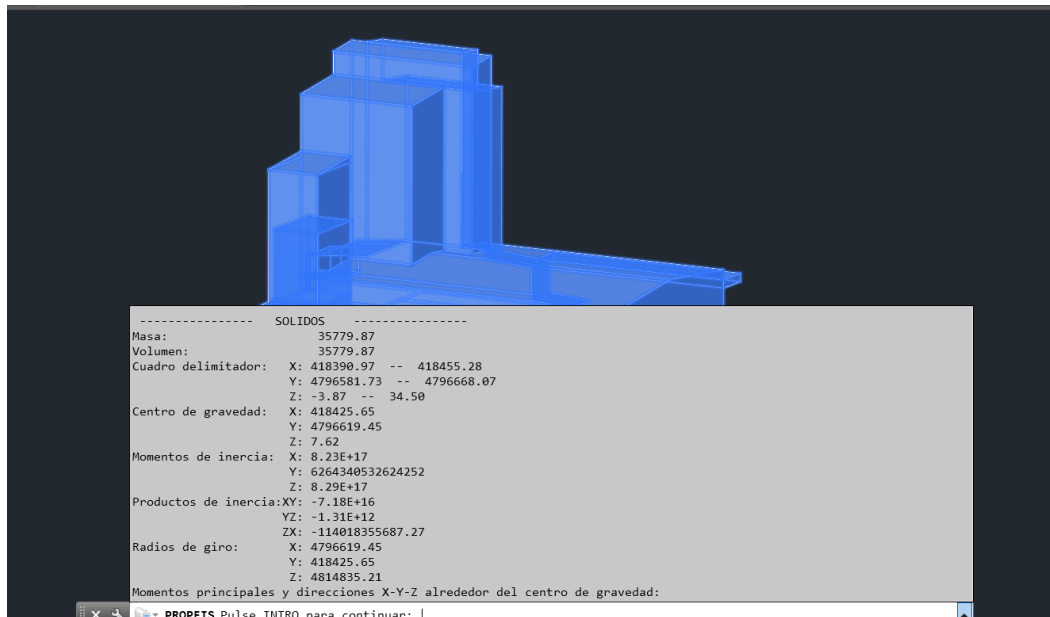


Perímetro Agisoft: 82.375m

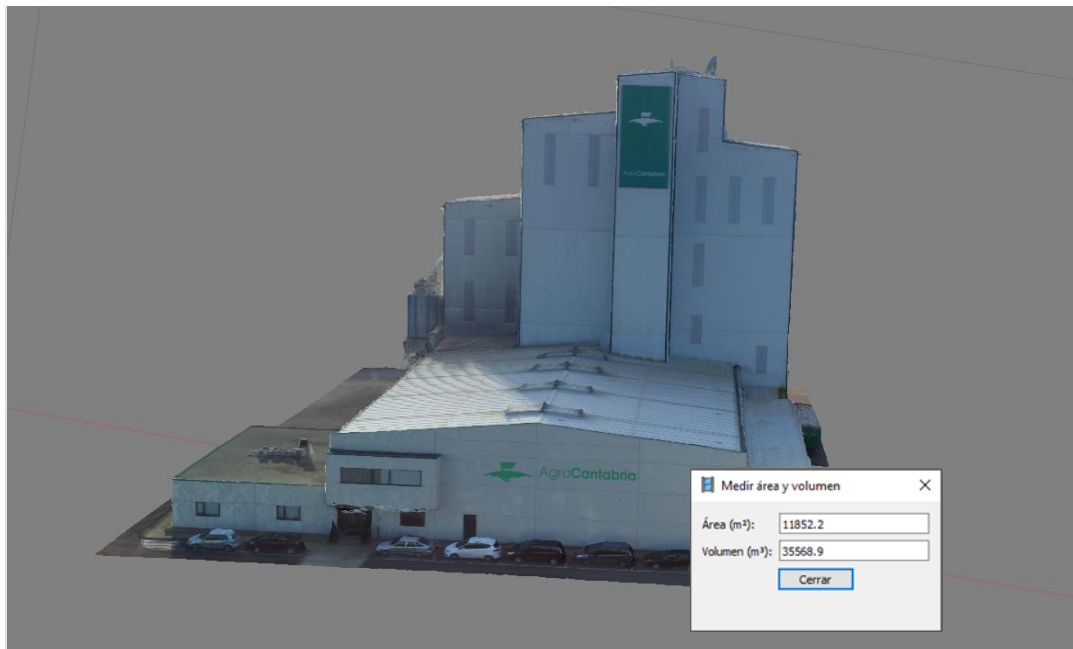


VOLUMEN

Volumen AutoCad: 35779.87m³



Volumen Agisoft: 35568.9m³



A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos:

TABLA DE RESULTADOS		
DISTANCIAS	Agisoft	AutoCad
	16,4m	16,59m
	39,9m	39,89m
	7,65m	7,63m
	31,5m	31,81m
	17,5m	18,47m
	12,3m	13,06m
	85,2m	84,45m
ALTURAS	8,15m	8,32m
	29,10m	29,50m
	30,6m	30,78m
	23,2m	23,63m
	3,96m	4m
COORDENADAS	(416001,62 4797692,90 77,84)	(419807,97 4797013,96 75,9)
	(416009,24 4797656,77 106,904)	(419816,36 4796975,98 104,80)
	(415985,89 4797667,99 111,97)	(419791,53 4796989,18 109,89)
PERÍMETROS	55,241m	57,22m
	82,375m	82,67m
VOLUMEN TOTAL	35568,9m3	35779,87m3

Tabla Número 4.1.-Tabla de resultados

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

ÍNDICE

1. DISCUSIÓN.....	141
2. CONCLUSIONES.....	142

1. DISCUSIÓN

Una vez conocidos los resultados obtenidos por ambas metodologías recogidos en el capítulo anterior, se han podido conocer las fortalezas y limitaciones de los elementos empleados en este trabajo fin de grado. A continuación, se detalla las limitaciones, las cuales pueden servir de ayuda en posibles estudios futuros de contraste de modelos digitales del terreno realizados con drones.

- Atendiendo a los resultados del modelo generado a partir de los puntos medidos mediante tecnología dron, para mejorar la precisión del modelo, sería preciso disponer de una cámara digital de gama alta (4K/ 21Mpx) en lugar de una cámara estándar. Una cámara digital de dichas prestaciones permite calidades fotográficas altas, reduciendo el error de pixel en el modelo, y mejorando las mediciones en el mismo.
- Con la estación total empleada (Leica TS02) se ha observado que en la medida de las distancias más largas, el tiempo de respuesta del instrumento ha sido algo lento. Para una medición más precisa y rápida, sería necesario el empleo de una estación topográfica de altas prestaciones, agilizando el proceso y obteniendo mejores resultados.
- En cuanto al software de procesamiento de datos, en este trabajo fin de grado se han podido conocer en profundidad las herramientas del programa Agisoft. Este software fotogramétrico permite procesar los datos en diferentes calidades (baja, media, alta y muy alta). Para la obtención de resultados muy precisos, los procesos pueden tardar varias horas incluso días, y, una vez procesados los datos, los archivos son muy pesados. Esto es debido a que el ordenador empleado no tenía capacidad para trabajar con dicho archivo, ni procesar con rapidez los datos. Para evitarlo, es necesario contar con un sistema operativo, con gran capacidad de memoria ram, así como una buena tarjeta gráfica. Esto permitirá un procesamiento muy rápido, proporcionando al mismo tiempo resultados precisos. Así mismo la medida del volumen en este software no ha sido sencilla, empleando más tiempo en el trabajo, sería necesario exportar el modelo generado en Agisoft a otro software como AutoCad o Microstation, los cuales permiten una mayor precisión en la medida de magnitudes como áreas y volúmenes.
- Realización de un estudio de errores en ambas técnicas, para validar que metodología mide con mayor precisión.

2. CONCLUSIONES

Comparando los resultados de las técnicas topográficas clásicas con la tecnología dron recogidos en el apartado anterior se puede concluir lo siguiente:

- La precisión en la medida de distancias tanto en los ejes (x, y) como en el eje (z) es muy similar en ambas metodologías. Se puede observar incluso, que en varios casos varían 1cm entre ellas. Aunque las precisiones son muy similares, se ha observado que la medición de alturas en el eje z del MDT del dron, empiezan a distanciarse más de las medidas del MDT mediante topografía clásica.
- El principal inconveniente de la metodología dron, es que, a la hora de conocer la ubicación de un punto, es el usuario el que de forma manual precisa el punto objeto de medición, existiendo además del error del pixelado, el error de selección manual. Al contrario, las técnicas topográficas clásicas proporcionan únicamente los puntos medidos en campo, por lo tanto al medir un punto concreto, bastaría con introducir las coordenadas calculadas, o seleccionarlo sin existir puntos similares.
- Una de las magnitudes objeto de contraste es el volumen total de la nave. En este caso la precisión es notablemente mayor la del modelo obtenido por topografía clásica. Como se ha dicho anteriormente, Agisoft presenta una herramienta muy inexacta y laboriosa para la medición de esta magnitud.

Cabe destacar que estas conclusiones pudieran ser diferentes en el caso de disponer de una cámara digital de mejores prestaciones, y un software de procesamiento de datos con más herramientas de medición sobre el modelo creado.

En cualquier caso es cierto que mientras que los levantamientos por topografía clásica permiten determinar una serie de puntos que sirven para crear un modelo preciso. El levantamiento topográfico de un dron captura a la vez millones de puntos y le añade además la información de color de las fotografías, con lo que consigue nubes de puntos de alta resolución mostrando la apariencia real del terreno. La captura masiva de puntos, elimina el riesgo de tener que volver a tomar datos por si faltase información, como en el caso de la topografía clásica.

Como conclusión final, los modelos digitales del terreno creados a partir de la tecnología dron son más detallados, aportando mayor información del terreno mientras que los modelos obtenidos con estaciones totales solo contienen los puntos medidos en campo. No obstante en cuanto a precisión y según las mediciones realizadas en este trabajo fin de grado, los resultados obtenidos por técnicas topográficas clásicas y los obtenidos mediante tecnología dron, presentan resultados muy similares, no pudiendo concretar qué metodología tiene mayor precisión.

CAPÍTULO VI: REFERENCIAS

REFERENCIAS

- [1] Julio Manuel De Luis Ruiz. (2010). Topografía y geodesia. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía.
- [2] www.ign.es
- [3] Jose Luís Lerma García. Fotogrametría moderna: Analítica y Digital. Universidad Politécnica de Valencia.
- [4] Julio Manuel De Luis Ruiz. (2016). Fotografía digital mediante drones
- [5] Martínez, R. Topografía y Sistemas de Información. Editorial Bellisco. Madrid, 2000.
- [6] Leonardo Casanova Matera. (2003) Topografía Plana. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería, departamento de vías.
- [7] Enrique D. Arrufat Molina. (2006). Instrumentos Topográficos. Tirant lo Blanch.
- [8] Raúl Pereda García, Javier M^a. Sánchez Espeso. Topografía y geodesia. Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos.
- [9] Julio Manuel De Luis Ruiz. (2010). Topografía aplicada a la ingeniería. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía.
- [10] Domínguez García-Tejero, Francisco. Topografía general y aplicada.
- [11] David Hernández López. (2006) Introducción a la fotogrametría digital. E.T.S.I Agrónomos. Universidad de Castilla La Mancha.
- [12] <http://drones.uv.es>
- [13] <https://www.seguridadaerea.gob.es>
- [14] <https://dronprofesional.com>
- [15] <https://www.yuneec.com>
- [16] <https://www.hispadrones.com>
- [17] Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. (A. Barrientos, J del Cerro, P. Gutiérrez, R. San Martín, A. Martínez, C. Ross. Grupo de Robótica y Cibernética, Universidad Politécnica de Madrid
- [18] <http://www.ing.unne.edu.ar>
- [19] <http://www.fi.unsj.edu.ar/>
- [20] Rafael Ferrer Torio y Ángel Valverde Gonzalo (1998). Cartografía, Geodesia y Fotogrametría. XIV Cursos de verano Laredo. Universidad de Cantabria. Ayuntamiento de Laredo.
- [21] <http://redgeomatrica.rediris.es>